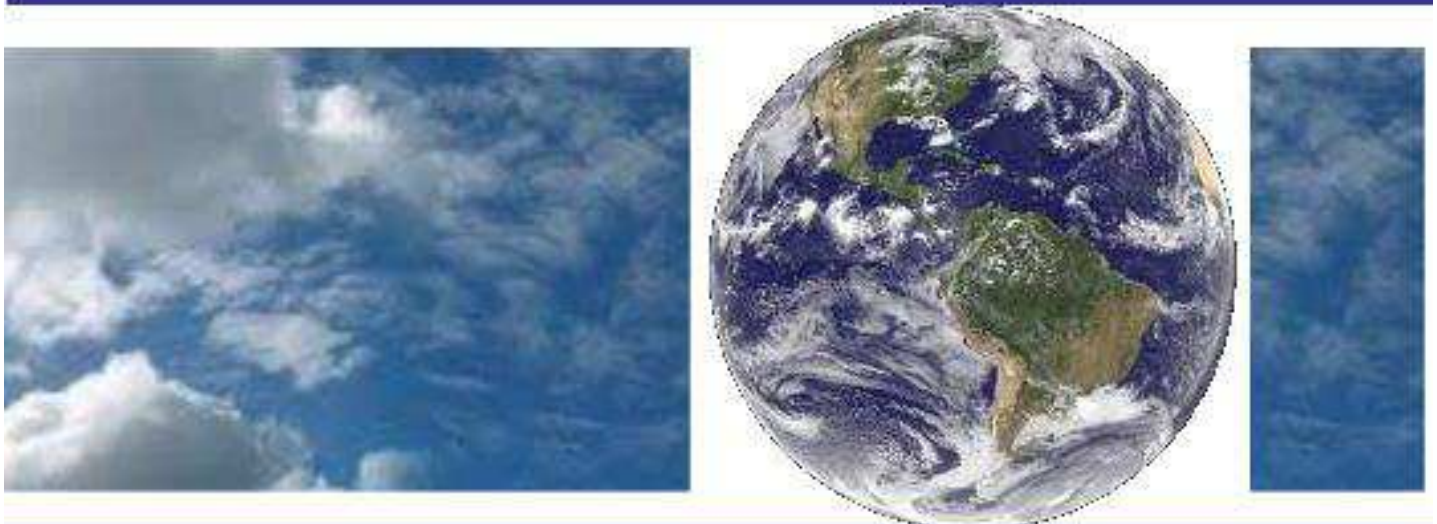


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

METEOROLOGIA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Gemeson Alves da Silva

**IMPACTOS DO ENOS (EL NIÑO – OSCILAÇÃO SUL)
NO POTENCIAL EÓLICO DO NORDESTE
BRASILEIRO: UMA ANÁLISE EM CONDIÇÕES
ATMOSFÉRICAS COM E SEM A INFLUÊNCIA DO
ATLÂNTICO TROPICAL SUL**

Campina Grande, Fevereiro de 2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS - CTRN
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS - UACA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA - PPGMet

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**IMPACTOS DO ENOS (EL NIÑO – OSCILAÇÃO SUL) NO
POTENCIAL EÓLICO DO NORDESTE BRASILEIRO: UMA
ANÁLISE EM CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS COM E SEM A
INFLUÊNCIA DO ATLÂNTICO TROPICAL SUL**

GEMESON ALVES DA SILVA

Campina Grande – PB

Fevereiro de 2021

GEMESON ALVES DA SILVA

**IMPACTOS DO ENOS (EL NIÑO – OSCILAÇÃO SUL) NO
POTENCIAL EÓLICO DO NORDESTE BRASILEIRO: UMA ANÁLISE
EM CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS COM E SEM A INFLUÊNCIA DO
ATLÂNTICO TROPICAL SUL**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande para obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Área de concentração: Meteorologia de meso e largas escalas

Sub-Área: Variabilidade e Mudanças climáticas

Orientadora: Profa Dra. Magaly de Fátima Correia

Campina Grande-PB

Fevereiro de 2021

S586i Silva, Gemeson Alves da.
Impactos do El niño - oscilação sul no potencial eólico do Nordeste brasileiro: uma análise em condições atmosféricas com e sem a influência do Atlântico Tropical Sul / Gemeson Alves da Silva. – Campina Grande, 2021.
78 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2021.
"Orientação: Prof.^a Dr.^a Magaly de Fátima Correia".
Referências.

1. Atlântico Tropical Sul. 2. Anomalias de TSM. 3. Vento. 4. Nordeste brasileiro. I. Correia, Magaly de Fátima. II. Título.

CDU 551(043)

GEMESON ALVES DA SILVA

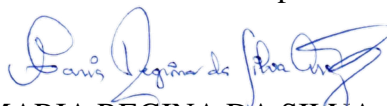
IMPACTOS DO ENOS (EL NIÑO – OSCILAÇÃO SUL) NO POTENCIAL EÓLICO
DO NORDESTE BRASILEIRO: UMA ANÁLISE EM CONDIÇÕES
ATMOSFÉRICAS COM E SEM A INFLUÊNCIA DO ATLÂNTICO TROPICAL
SUL

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 26/02/2021

BANCA EXAMINADORA



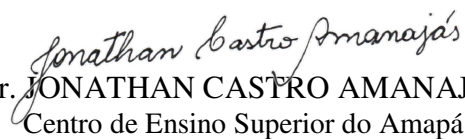
Profa. Dra. MAGALY DE FATIMA CORREIA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Profa. Dra. MARIA REGINA DA SILVA ARAGÃO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Dr. JONATHAN CASTRO AMANAJÁS
Centro de Ensino Superior do Amapá

A minha família e em especial a minha esposa.

Eu dedico!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por sempre me proporcionar trilhar nos melhores caminhos.

À minha orientadora, Dra. Magaly de Fátima Correia, por me abrir os olhos pelo interesse na pesquisa, acreditando na minha capacidade de aperfeiçoamento, pela atenção, disponibilidade, compreensão, conselhos e ensinamentos não só para esta pesquisa, mas em praticamente todo o período da graduação e do mestrado.

A CAPES pelo fomento da bolsa de Mestrado.

Ao corpo docente e funcionários do Departamento de Ciências Atmosféricas, que foram sempre competentes e atenciosos.

Aos membros da banca examinadora, Magaly de Fátima Correia, Enilson Palmeira Cavalcanti, Maria Regina da Silva Aragão e Jonathan Castro Amanajás, pelas valiosas contribuições em minha pesquisa.

A minha esposa Luciene, por estar comigo durante alguns dos momentos mais difíceis em minha jornada.

As amigades que firmei com Diego Rhamon e Melquizedek Rafael (vulgo Melk) e outros tantos amigos e colegas.

*“A sabedoria serve de freio à juventude,
de consolo aos velhos, de riqueza aos
pobres e de ornamento aos ricos”.*

Diógenes de Sinope.

RESUMO

O presente trabalho foi desenvolvido com o propósito de avaliar os impactos causados pelo El Niño - Oscilação Sul (ENOS) e anomalias da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Atlântico Tropical Sul (ATS) no potencial eólico do nordeste brasileiro (NEB). Para isso, partiu-se da premissa de que variações significativas no padrão de ventos nessa região podem resultar de um efeito conjunto de anomalias da TSM do Atlântico Tropical Sul e das anomalias da TSM no Pacífico Tropical. As análises foram concentradas no trimestre, dezembro, janeiro e fevereiro (DJF), do período de 1980 a 2000. Enfoque especial foi dado aos episódios de ENOS caracterizados pela ocorrência simultânea da TSM no Atlântico Tropical Sul (AAT⁺⁺), em episódios de El Niño, e anomalias negativas de TSM no Atlântico Tropical Sul (AAT⁻), em episódios de La Niña. Para atingir os objetivos foram utilizados dados de alta resolução espacial provenientes da reanálise do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* do conjunto de dados do *ERA-5 Land* para o NEB e também para a estação meteorológica do INMET localizada em Petrolina-PE. Os resultados indicam que a ocorrência simultânea de anomalias no Pacífico Tropical e Atlântico Tropical Sul causam variações significantes na intensidade do vento na região Nordeste do Brasil. Na área de Petrolina-PE, verificou-se que em episódios de El Niño os ventos são relativamente mais intensos. No entanto, a ocorrência simultânea de AAT⁺⁺ (anomalias positivas no Atlântico Tropical Sul), nesses casos, contribuem para reduzir a intensidade do vento. Por outro lado, nos episódios de La Niña, a presença de AAT⁻ (anomalias negativas no Atlântico Tropical Sul) contribui com o fortalecimento do vento caracterizando condições favoráveis a produção de energia eólica na região.

Palavras-Chave: Atlântico Tropical Sul, Anomalias de TSM, Vento, Nordeste brasileiro.

ABSTRACT

The present work was developed with the purpose of evaluating the impacts caused by ENOS (El Niño - South Oscillation) and TSM anomalies in the South Tropical Atlantic (ATS) on NEB's wind potential. To this end, it was assumed that significant variations in the wind pattern in this region may result from a joint effect of TSM anomalies in the South Tropical Atlantic and TSM anomalies in the Tropical Pacific. The analyzes were concentrated in the quarter, December, January and February (DJF), from the period 1980 to 2000. Special focus was given to ENOS episodes characterized by the simultaneous occurrence of positive anomalies of the sea surface temperature in the South Tropical Atlantic (AAT ++), in El Niño episodes, and negative SST anomalies in the South Tropical Atlantic (AAT- -), in La Niña episodes. To achieve the objectives, high spatial resolution data from the reanalysis of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts from the ERA-5 Land data set for NEB and also for the INMET weather station located in Petrolina-PE were used. The results indicate that the simultaneous occurrence of anomalies in the Tropical Pacific and Tropical South Atlantic causes significant variations in wind intensity in the Northeast region of Brazil. In the Petrolina-PE area, it was found that in El Niño episodes the winds are relatively more intense. However, the simultaneous occurrence of AAT ++ (positive anomalies in the South Tropical Atlantic), in these cases, contributes to reduce the intensity of the Wind. On the other hand, in the La Niña episodes, the presence of AAT- - (negative anomalies in the South Tropical Atlantic) contributes to the strengthening of the wind, characterizing favorable conditions for the production of wind energy in the region.

Keywords: South Atlantic Tropical, TSM Anomalies, Wind, Northeast Brazil.

LISTA DE SIGLAS

AATN - Anomalias da Temperatura da superfície do Mar no Atlântico Tropical Norte
AATS – Anomalias da Temperatura da superfície do Mar no Atlântico Tropical Sul
ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
ASAS – Alta Subtropical do Atlântico Sul
ATN – Atlântico Tropical Norte
ATS – Atlântico Tropical Sul
CFSR – Climate Forest System Reanalysis
COVID -19 – Corona Virus Disease 2019
DJF – Dezembro, Janeiro e Fevereiro
ECMWF - *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*
ENOS – El Niño-Oscilação Sul
GrADS – Grid Analysis and Display System
GW – GigaWatts
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
MW – MegaWatts
Onshore – Na Terra
Offshore – No Mar
OS – Oscilação Sul
OMM – Organização Meteorológica Mundial
PCD – Plataforma de Coletas de Dados
PE – Pernambuco
NEB - Nordeste Brasileiro
SIN – Sistema Interligado Nacional
TSM – Temperatura da Superfície do Mar
TW – TeraWatts

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
OBJETIVOS	3
1.1 OBJETIVO GERAL	3
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
2. A EVOLUÇÃO E O CENÁRIO RECENTE DA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL	4
2.2 CAPACIDADE INSTALADA DO BRASIL	5
2.3 FATOR DE CAPACIDADE	7
2.4 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	7
2.5 COMPLEMENTARIEDADE DO RECURSO EÓLICO E HIDRÁULICO	8
2.6 DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO	10
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3.1 PADRÕES DE VARIABILIDADE CLIMÁTICA DO PACÍFICO TROPICAL E ATLÂNTICO TROPICAL.....	13
3.1.1 El Niño Oscilação Sul (ENOS)	13
3.1.2 Célula de Walker	17
3.1.3 Teleconexões	18
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1 A INFLUÊNCIA DOS OCEANOS PACÍFICO E ATLÂNTICO TROPICAL SUL NA VARIABILIDADE CLIMÁTICA DO NEB	19
4.2 INTENSIDADE E DIREÇÃO DO VENTO	20
4.2.1 Validação de dados de vento proveniente de reanálise	21
4.2.2 O uso de dados de vento proveniente de reanálise na estimativa do potencial eólico	21
4.2.3 Estimativa da velocidade do vento em maiores alturas	22
4.2.4 Cálculo da densidade de potência eólica	23
5. MATERIAIS E MÉTODOS	24
5.1 ÁREA DE ESTUDO	24
5.1.1 <i>Análise regional - Nordeste brasileiro (NEB)</i>	24
5.1.2 <i>Análise local - Petrolina (PE)</i>	25
5.3 MATERIAIS	26
5.2.1 Dados de reanálise com alta resolução espacial	26
5.4 METODOLOGIA	28
5.3.1 Seleção de episódios nos oceanos Pacífico e Atlântico Tropical Sul	28
5.4.2 GrADS - Software Grid Analysis and Display System	31

5.4.3 Processamento dos dados	31
5.4.4 Distribuição espacial da intensidade do vento a 10 m em todo o NEB	31
5.4.5 Características do vento no local de análise	32
5.4.5.1 Direção Predominante do vento em Petrolina (PE).....	32
6.4.5.2 Ciclo diário da intensidade do vento em Petrolina (PE) para cada um dos meses no trimestre DJF	32
5.4.5.3 Ciclo diário da intensidade do vento nas alturas de 10 m, 25m, 100 m e 150 m em Petrolina-PE...	33
5.4.6 Perfil Vertical do Vento	33
5.4.7 Tratamento probabilístico do vento	35
5.4.8 Estimativa da densidade de potência eólica	38
5.4.9 Box-plot - Análise e interpretação de dados quantitativos	38
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
6.1 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA INTENSIDADE MÉDIA DO VENTO A 10 METROS EM TODO O NEB.....	40
6.2 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA DIFERENÇA DE INTENSIDADE DO VENTO NO NEB.....	41
6.2.1 Média do El Niño com Anomalias da TSM no Atlântico Sul (ELcomAATS)	41
6.2.2 Média do El Niño sem Anomalias da TSM no Atlântico Sul (ELsemAATS)	42
6.2.3 Média da La Niña com Anomalias de TSM no Atlântico Sul (LcomAATS)	44
6.2.4 Média da La Niña sem Anomalias da TSM no Atlântico Sul (LsemAATS)	44
6.3 CARACTERÍSTICAS DO VENTO EM PETROLINA (PE)	46
6.3.1 Direção predominante do Vento	47
6.3.2 Ciclo diário da intensidade mensal do vento em Petrolina (PE) no trimestre DJF	51
6.3.2.1 Análise Box-Plot para Petrolina (PE) – Episódios de ELcomAATS e ELsemAATS.....	52
7.3.2.2 Petrolina-PE: Episódios de LcomAATS e LsemAATS.....	54
6.3.2.3 Análise estatística descritiva para Petrolina-PE – Episódios de LcomAATS e LsemAATS.....	55
6.3.3 Ciclo diário da intensidade do vento em Petrolina-PE para o trimestre DJF nas alturas de 10 m, 25 m, 100 m e 150 m.	57
6.3.3.1 El Niños.....	57
6.3.3.2 Análise estatística descritiva para Petrolina – PE – Episódios de ELcomAATS e ELsemAATS.....	57
6.3.3.3 La Niñas.....	59
6.3.3.4 Análise estatística descritiva para Petrolina-PE – Episódios de LcomAATS e LsemAATS.....	59
6.3.4 Distribuição de Weibull	62
6.3.5 Estimativas da Densidade de Potência Eólica em Petrolina (PE)	65
7. CONCLUSÕES	68
8. REFERÊNCIAS	69
9. FONTE DAS FIGURAS	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da capacidade instalada em MW no Brasil. Valores para o futuro, até 2024 levam em consideração os contratos já viabilizados em leilões já realizados e no mercado livre.	5
Figura 2 - Capacidade instalada e números de parques por estado.	6
Figura 3 - Potência eólica instalada nos estados brasileiros com destaque para a região nordeste. Informações com apenas valores dos estados com potência superior a 1 MW de usinas eólicas fiscalizadas. Dados atualizados até o mês de outubro de 2020.	6
Figura 4 - Fatores de geração de energia mínimo, médio e máximo em 2018, de empreendimentos eólicos, por estado	7
Figura 5 - Matriz elétrica Brasileira em GW. Valores referentes até o mês de outubro de 2020.	8
Figura 6 - Complementariedade do recurso eólico e hidráulico no NEB de agosto de 2016 até novembro de 2020.	9
Figura 7 - Mapa de carreiras no setor de energia eólica.	11
Figura 8 - Impactos dos investimentos no setor eólico na economia das regiões Nordeste e Sul.	12
Figura 9 - Localizações dos índices Niño4, Niño3.4, Niño3 e Niño1+2. Darwin e Taiti estão marcados com um X.	13
Figura 10 - Diferença de pressão do ar atmosférico entre Darwin e Taiti.	14
Figura 11 - Padrão de circulação observada em condições normais na região equatorial do Oceano Pacífico. Barra inferior: escala de temperatura da superfície do mar (TSM).	14
Figura 12 - Padrão de circulação observada em anos de El Niño na região equatorial do Oceano Pacífico. Barra inferior: escala de temperatura da superfície do mar (TSM).	15
Figura 13: Evolução da TSM em episódios de El Niños de 1994 a 2007 na região do Niño3.	15
Figura 14: Padrão de circulação observada em anos de La Niña na região equatorial do Oceano Pacífico. Barra inferior: escala de temperatura da superfície do mar (TSM).	16
Figura 15 - Evolução da TSM em episódios de La Niñas de 1994 a 2007 na região do Niño3.	16
Figura 16 - Circulação da célula de Walker em condições normais.	17
Figura 17 - Circulação da célula de Walker em condições de El Niño.	17
Figura 18 - Circulação da célula de Walker em condições de La Niña	18

Figura 19 – Localização geográfica do Nordeste brasileiro destacado na cor vermelha.	24
Figura 20 – Mapa hipsométrico do Nordeste do Brasil com destaque para região de Petrolina (PE).	25
Figura 21 - Representação da resolução em pontos de grades na utilização para um modelo atmosférico.	27
Figura 22 - Localização da área do Índice de Niño – 3.	29
Figura 22.1 - Localização geográfica do local de onde foram analisadas as anomalias de TSM no Atlântico Tropical Sul para os ‘episódios no ATS’.....	30
Figura 23 - Evolução das alturas dos aerogeradores.....	35
Figura 24 - A Figura ilustra um exemplo de uma FDP de Weibull.....	37
Figura 24.1 - Função de densidade de probabilidade de Weibull com k variando.....	38
Figura 24.2 – Informações contidas no box-plot.....	40
Figura 25 - Distribuição espacial da intensidade do vento (m/s) sobre o NEB para o trimestre de DJF. Média dos valores entre os anos de 1980 a 2000.....	40
Figura 26 - 26a e 26b – Distribuição espacial da diferença entre a intensidade média do vento (m/s) em episódio de ELcomAATS e a média do período de 1980 a 2000, para o trimestre DJF: a) El Niño de 1982 – 83; b) El Niño de 1997 – 98.	42
Figura 27 - a) e b) – Distribuição espacial da diferença entre a intensidade média do vento (m/s) em episódio de ELsemAATS e a média do período de 1980 a 2000, para o trimestre DJF: a) El Niño de 1991 – 92; b) El Niño de 1986 – 87.	43
Figura 28 - Distribuição espacial da diferença entre a intensidade média do vento (m/s) em episódio de LcomAATS e a média do período de 1980 a 2000, para o trimestre DJF: La Niña de 1996 – 97.	44
Figura 29 - Distribuição espacial da diferença entre a intensidade média do vento (m/s) em episódio de LsemAATS e a média do período de 1980 a 2000, para o trimestre DJF: a) La Niña de 1988 – 89; b) La Niña de 1998 – 99.	45
Figura 30 - Rosa dos ventos, velocidade, direção e classes com frequência de ocorrência da velocidade do vento a 10 m acima da superfície no ponto de grade da cidade de Petrolina, no trimestre DJF do período de 1980 a 2000.	47
Figura 31 - Rosa dos ventos, velocidade, direção e classes com frequência de ocorrência da velocidade do vento a 10 m acima da superfície observada em ELcomAATS (a) e (b); ELsemAATS (c) e (d). Fonte de dados: ECMWF.	48
Figura 32 - Ciclo diário da intensidade do vento para os meses do trimestre DJF. (a) dezembro, (b) janeiro e (c) fevereiro na cidade de Petrolina-PE, análises durante episódios de	

ELcomAATS curva azul, ELsemAATS curva vermelha e média de 1980 a 2000 curva verde.	51
Figura 33 - Intensidade do Vento (m/s) para os meses do trimestre DJF.: (a) Média do período 1980 a 2000; (b) ELcomAATS e (c) ELsemAATS..	53
Figura 34 - Ciclo diário da intensidade do vento para os meses do trimestre DJF. (a) dezembro, (b) janeiro e (c) fevereiro na cidade de Petrolina-PE, análises durante episódios de LAcomAATS curva azul, LAsemAATS curva vermelha e média de 1980 a 2000 curva verde.	55
Figura 35 - Intensidade do Vento (m/s) para os meses do trimestre DJF.: (a) Média do período 1980 a 2000; (b) LAcomAATS e (b) LAsemAATS.	56
Figura 36 - Ciclo médio diário da intensidade do vento em Petrolina no trimestre DJF, (a) Média de 1980 a 2000, (b)ELcomAATS, (c) ELsemAATS.	57
Figura 37 - Intensidade do Vento (m/s) para o trimestre DJF.: (a) Média do período 1980 a 2000; (b) ELcomAATS e (b) ELsemAATS. A caixa azul, laranja e amarela indica a intensidade do vento a 10 m, 100 m e 150 m respectivamente.	58
Figura 38 - Ciclo médio diário da intensidade do vento em Petrolina no trimestre DJF, (a) Média de 1980 a (b) LAcomAATS, (c) LAsemAATS.	59
Figura 39 - Intensidade do Vento (m/s) para o trimestre DJF.: (a) Média do período 1980 a 2000; (b) LAcomAATS e (b) LAsemAATS. A caixa azul, laranja e amarela indica a intensidade do vento a 10 m, 100 m e 150 m respectivamente.	60
Figura 40 - Campo do vento (m/s) a 24 m da superfície no domínio numérico (resolução de 2km). Simulação com lago: (a) 15 HL; Simulação sem lago (b) 15 HL. Diferença entre as simulações com lago e sem lago: (c) 15 HL. Fonte: Modificado de Correia (2001).....	62
Figura 41 - Função Distribuição de frequência e ajuste da distribuição de Weibull para a velocidade do vento em 10 m, 100 m e 150 m acima da superfície, (a), (d) e (g) média de 1980 a 2000, (b), (e) e (h) ELcomAATS, (c), (f) e (i) ELsemAATS respectivamente.	64
Figura 42 - Função Distribuição de frequência e ajuste da distribuição de Weibull para a velocidade do vento em 10 m, 100 m e 150 m acima da superfície, (a), (d) e (g) média de 1980 a 2000, (b), (e) e (h) LAcomAATS, (c), (f) e (i) LAsemAATS respectivamente.	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Abreviatura dos episódios analisados.....	31
Quadro 2: Episódios de El Niño/La Niña e Atlântico Tropical Sul Quente/Frio ocorrendo simultaneamente (ELcomAATS e LAcomAATS), episódios de El Niño/La Niña e Atlântico Tropical Sul apresentando condições normais de TSM (ELsemAATS e LAssemAATS). Seleção realizada entre 1980 a 2000.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros meteorológicos em Petrolina (PE).....	67
--	----

1. INTRODUÇÃO

A matriz elétrica brasileira é bastante diversificada e tem colocado o Brasil em uma posição de destaque por ser composta aproximadamente por 83% de energia renovável, ficando bem acima da média mundial que é em torno de 25% (ABEEÓLICA, 2020). A principal fonte geradora de energia elétrica no Brasil ainda é a hidráulica que, até metade do segundo semestre de 2020 foi responsável por 59,2% da produção de energia elétrica no país (ABEEOLICA, 2020). Contudo, a energia eólica vem tomando cada vez mais espaço na matriz elétrica brasileira, tendendo a ser uma das principais fontes de geração de energia elétrica com a participação de aproximadamente 10% na matriz elétrica do país.

O crescimento expressivo, em nível mundial, da aquisição e implementação de sistemas de aproveitamento da energia eólica como fonte alternativa para geração de energia elétrica trouxe novos desafios não só para os operadores do sistema elétrico, mas para todos os setores que lidam diretamente com impactos resultantes de mudanças climáticas e que incentivam o uso da energia limpa e renovável obtida a partir do vento como garantias de progresso com sustentabilidade

O Brasil, conforme mencionado pela ABEEólica (2020), está em 7º lugar no ranking mundial de capacidade instalada. Em 2012 o Brasil ocupava a 15º posição. A capacidade instalada de geração eólica vem crescendo significativamente e batendo recordes de produção no setor. No entanto, com uma participação mais significativa da geração eólica na matriz energética é também perceptível o surgimento de uma fonte adicional de incertezas já que o comportamento dos ventos é bastante variável. Neste sentido, é indispensável o desenvolvimento de estudos que possibilitem uma maior compreensão da dinâmica da atmosfera e conseqüentemente a utilização de métodos que permitam estimativas mais precisas do potencial eólico e geração de energia numa determinada região.

O Nordeste Brasileiro (NEB) é uma região bastante promissora para ser explorada no contexto de energia eólica, por ser geograficamente favorável. O vento nessa região está associado a circulações de meso e de grande escala, circulações do tipo brisa marítima/terrestre, ventos alísios entre outros sistemas (CHAVES FILHO, 2016). Outro detalhe, refere-se ao clima do NEB que é condicionado pela influência dos oceanos Pacífico e Atlântico. Vários estudos indicam evidências de que variações de TSM no Oceano Pacífico Tropical e Atlântico Tropical desempenham um papel importante na variabilidade do vento. Como mencionado nos estudos de Wang *et al.* (2006); Gonzalez (2011) e Kayano *et al.*

(2011), o ENOS no oceano Pacífico Tropical, por exemplo, se relaciona com o oceano Atlântico Tropical via circulação de Walker alterando o padrão do vento na América do Sul e consequentemente no NEB.

Alguns estudos atribuem a variabilidade do clima na América do Sul ao fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS), outros atribuem essa variabilidade ao efeito conjunto do oceano Pacífico e Atlântico onde o Atlântico é destacado por ter uma influência mais significativa do que o Pacífico na variabilidade climática em algumas épocas do ano (UVO *et al.*, 1998; ANDREOLY e KAYANIO 2005; REBOITA *et al.*, 2014). Esses autores concluíram, por exemplo, que a TSM no Atlântico Tropical possui um controle mais significativo das chuvas do NEB do que a TSM no Pacífico Tropical. Outro detalhe importante diz respeito à influência do setor norte e sul do AT, em uma análise sobre a influência de alguns padrões de teleconexão na precipitação no Norte e Nordeste do Brasil, Reboita e Santos (2014) destacam que resultados de várias pesquisas indicam que a ocorrência de El Niño pode causar déficit de precipitação nessas regiões, enquanto que a ocorrência de La Niña leva ao excesso de precipitação, entretanto, os autores documentaram que nem sempre isso ocorre, pois a influência das anomalias de TSM do Atlântico Tropical Sul (AATS) e/ou Norte (AATN) se acopla ao efeito das anomalias de TSM do Pacífico Tropical, alterando valores de precipitação e de velocidade do vento. Esses autores também identificaram, por exemplo, que mesmo em anos de El Niño que é caracterizado por déficit de chuva em grande parte do Norte e Nordeste do Brasil, se o ATS está anormalmente frio, ou seja, as anomalias de TSM no ATS (AATS) forem negativas, podem então, ocorrer chuvas em toda a região do NEB durante o verão.

Tem sido amplamente divulgado na literatura que as variações da TSM no ATN estão intimamente relacionadas ao ENOS e que pode ser explicada através de um padrão de teleconexão, (CURTIS e HASTENRATH, 1995; ENFIELD e MAYER, 1997; GIANNINI *et al.*, 2000; ANDREOLY e KAYANO, 2005). Neste trabalho, a variabilidade da TSM no ATS é considerada para analisar os efeitos do Pacífico Tropical e do Atlântico Tropical Sul na intensidade dos ventos na região do NEB. A hipótese é que a influência da variabilidade da TSM no ATS é tão importante quanto a variabilidade da TSM no ATN.

Em resumo, as consequências normais das condições de El Niño e La Niña podem ser alteradas devido à influência das anomalias de TSM no oceano Atlântico Tropical, portanto é imprescindível levar em consideração a influência do ATS no comportamento das variáveis meteorológicas.

Na literatura ainda são poucos os estudos que abordam simultaneamente análises da influência individual e conjunta dos oceanos Pacífico Tropical e Atlântico Tropical no padrão dos ventos no NEB. De acordo com Brito (2018), a maioria dos estudos que trata de análises da influência do Pacífico Tropical e do Atlântico Tropical no NEB tem foco na precipitação, existem menos ainda, trabalhos que analisam o efeito conjunto do Pacífico Tropical e do ATS sobre os ventos nessa região para fins de exploração do potencial eólico. Sabendo então, que a aplicação da energia eólica vem crescendo cada vez mais em todo o mundo, que existem poucos estudos que analisa os efeitos simultâneos desses oceanos sobre os ventos no NEB e que ainda existe a expectativa de maiores investimentos do Governo Federal no setor de produção de energia eólica na região Nordeste do Brasil até o ano de 2021 (BEZERRA, 2019), esse trabalho foi elaborado visando contribuir ainda mais para esse crescimento partindo da premissa de que anomalias de ventos significantes no NEB podem resultar de um efeito conjunto de anomalias da TSM do Atlântico Tropical Sul e das anomalias de TSM no Pacífico Tropical (ENSO).

OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GERAL

O desenvolvimento deste trabalho tem como objetivo geral analisar os impactos causados pelo ENOS na intensidade do vento sobre o Nordeste Brasileiro sob duas condições: uma com a influência das AATS (Anomalias de TSM no Atlântico Tropical Sul) e a outra sem a influência das AATS.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a distribuição espacial da intensidade do vento sobre todo o NEB no período de 1980 a 2000, durante o trimestre de dezembro, janeiro e fevereiro (DJF), em todos os episódios de ENOS que ocorreram simultaneamente quando eram ou não observadas anomalias de TSM no Oceano Atlântico Tropical Sul.
- No período do item (i), analisar as características do vento e estimar a densidade de potência eólica na região de Petrolina – PE para as alturas de 10 m, 100 m e 150 m.

2. A EVOLUÇÃO E O CENÁRIO RECENTE DA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

O uso da energia eólica como fonte de energia elétrica no Brasil é bem recente quando comparada com o desenvolvimento em outros países como os Estados Unidos onde o início do uso da energia eólica para geração de energia elétrica ocorreu no final do século XIX, em meados 1888, enquanto o uso da energia eólica para geração de energia elétrica no Brasil ocorreu em meados 1992.

A primeira turbina eólica do Brasil foi instalada no arquipélago Fernando de Noronha (PE). Tinha 23 metros de altura e gerava em torno de 75 KW o que na época era suficiente para suprir 10% do consumo de energia da ilha (MELO, 2012). Desde então, a energia eólica como fonte de geração de energia elétrica no país foi sendo desenvolvida. Porém, o grande avanço ocorreu com a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), pelo governo federal através da lei nº 10.438/2002. O propósito dessa iniciativa era diversificar a matriz energética do país fomentando o mercado interno incentivando o uso desse recurso (fonte renovável).

Em 2006 o primeiro parque eólico do país foi instalado no município de Osório-RS. Essa foi a primeira usina de energia eólica registrada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a usina possuía 50 MW de capacidade instalada na época e era ligado ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Esse era o resultado das primeiras outorgas da ANEEL concedidas entre os anos de 2000 e 2004.

De 2006 a 2014 mesmo com o aumento de autorizações para ampliações de parques eólicos e consequente inclusão da energia eólica como fonte de energia elétrica na matriz energética brasileira, ainda pode ser considerado um processo lento. A partir desse período houve um grande crescimento da expansão do uso deste recurso no país. Em 2014 a matriz energética do Brasil totalizava 133 GW sendo 3,7% de energia eólica como uma das fontes de geração, a energia eólica já era exaltada como uma alternativa à hidroelétrica que na época passava por dificuldades devido a seca em grande parte do país.

No início de 2017 o Brasil alcançou a marca de 10,8 GW de energia eólica instalada e em operação, nesse ano constituía 7,1% da matriz elétrica brasileira atingindo a nona posição em capacidade de geração no mundo. Em 2018 a participação da energia eólica como fonte de geração de energia elétrica aumentou e passou a ter uma participação com 8,8%. Já em 2019 o Brasil conseguiu atingir aproximadamente 15,5 GW de capacidade instalada compondo a matriz energética com aproximadamente 10% como uma das fontes de geração, segundo o relatório de energia anual 2019, só nesse ano foi evitada a emissão de 22,85 milhões de

toneladas de CO_2 na atmosfera o que equivale em média a emissão anual de cerca de 21,7 milhões de automóveis.

2.2 CAPACIDADE INSTALADA DO BRASIL

O Brasil é o país com a maior capacidade de geração eólica instalada da América do Sul e até a data de realização deste trabalho ocupa a sétima posição no ranking mundial dos países com a maior capacidade de geração eólica instalada do mundo.

Levando em consideração os contratos viabilizados em leilões já realizados e no mercado livre, a capacidade instalada da geração eólica em 2024 alcançará aproximadamente 27 GW onde se estima que representará 12% da matriz energética do país, (Figura 1).

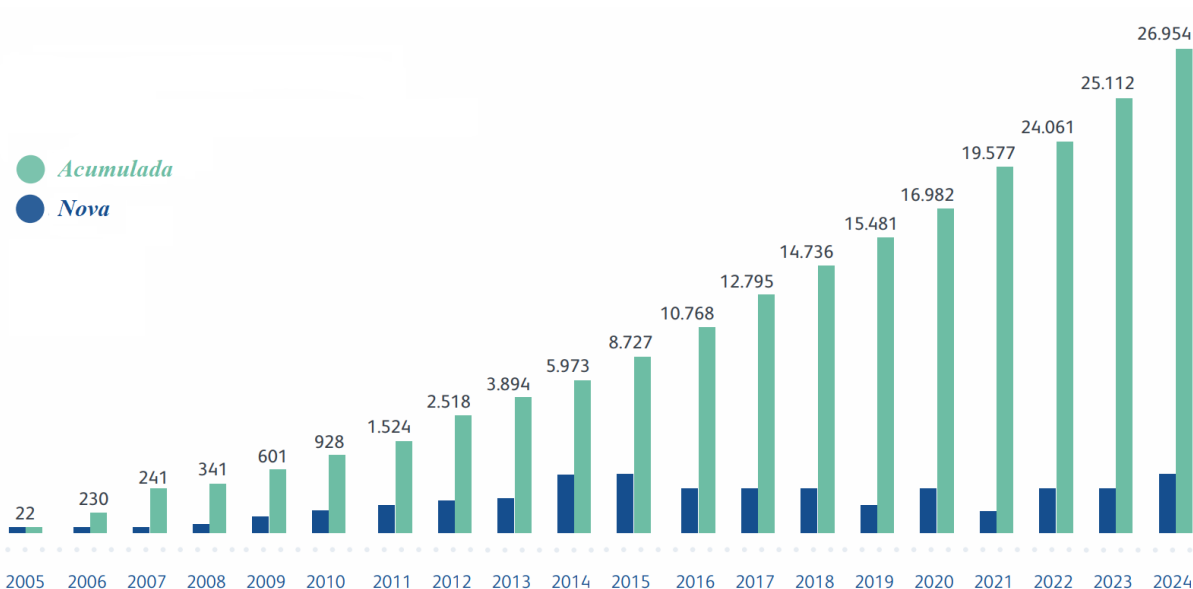


Figura 1 - Evolução da capacidade instalada em MW no Brasil. Valores para o futuro, até 2024 levam em consideração os contratos já viabilizados em leilões já realizados e no mercado livre.

Fonte: ABEEólica (2020).

Até a metade do segundo semestre de 2020 no final do mês de outubro, existiam ao todo 660 parques eólicos espalhados pelo país e mais de 8000 aerogeradores operando em 12 estados (Figura 2). Com a viabilização dos contratos já realizados e com o elevado potencial eólico possível para exploração do país, a tendência é que esses valores aumentem consideravelmente nos próximos anos.

Para se ter uma ideia, mais de 28,8 milhões de residências por mês podem ser abastecidas com energia eólica o que em média representa cerca de 86,3 milhões de habitantes. Em 2020, 94,4% da energia consumida no Nordeste veio da geração eólica o que

em média representou cerca de 9.255,73 MW/média. Até a data de 05/10/2020 14% da energia consumida no sistema Interligado Nacional (SIN), veio da geração eólica.

UF	Potência (MW)	Parques
RN	4.777,1	170
BA	4.506,4	176
CE	2.179,3	84
PI	1.979,4	69
RS	1.835,9	80
PE	798,4	34
MA	426,0	15
SC	238,5	14
PB	157,2	15
SE	34,5	1
RJ	28,1	1
PR	2,5	1
TT	16.963,1	660

Figura 2 - Capacidade instalada e números de parques por estado.
Fonte: ABEEólica (2020).

As condições favoráveis do vento no Nordeste brasileiro levam a uma grande produção de energia eólica. A ocorrência de ventos fortes geralmente concentrados no período seco é um dos fatores que explicam a maior participação da fonte eólica com cerca de 80% da geração do país e onde mais se investe em projetos de exploração eólica, (Figura 3).

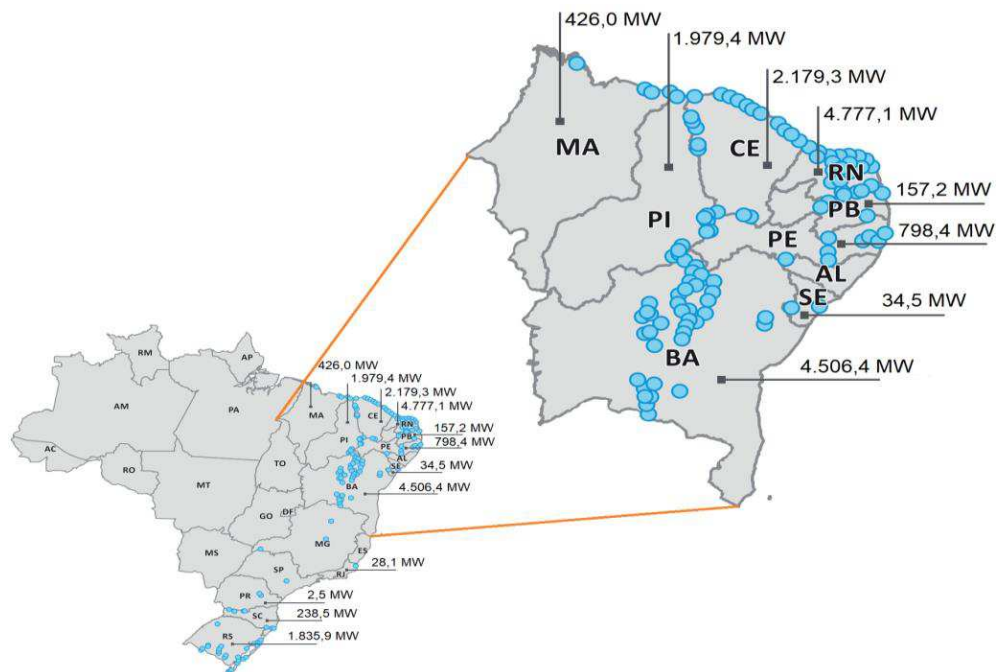


Figura 3 - Potência eólica instalada nos estados brasileiros com destaque para a região nordeste. Informações com apenas valores dos estados com potência superior a 1 MW de usinas eólicas fiscalizadas. Dados atualizados até o mês de outubro de 2020.

Fonte: Adaptado de - Bezerra (2019), com informações de: ABEEólica (2020).

2.3 FATOR DE CAPACIDADE

O fator de capacidade de geração de energia é um dado que mede a produtividade dos ventos. Cada estação de geração de energia elétrica possui seu respectivo fator de capacidade que nada mais é do que a produção efetiva de uma usina (nesse caso eólica) em um período de tempo e a capacidade máxima do que poderia ser obtido neste mesmo período. Esse valor em um parque eólico pode variar e depende principalmente das características do vento.

O valor do fator de capacidade do Brasil fica quase o dobro acima da média mundial. Em 2019, durante a “safra dos ventos” que é o período em que se observam os maiores valores de velocidade média do vento no país, o fator de capacidade foi 59% enquanto o da média mundial foi de aproximadamente 34%. No Nordeste brasileiro o fator de capacidade é o maior de todo o país, (Figura 4), sendo em média superior a 40% ficando acima da média da região sul do país (33,5%). Vale ressaltar que em geral, os valores do fator de capacidade dos parques eólicos instalados no Brasil, principalmente no NEB, superam bastante o fator de capacidade dos países Europeus, [Bezerra \(2019\)](#).

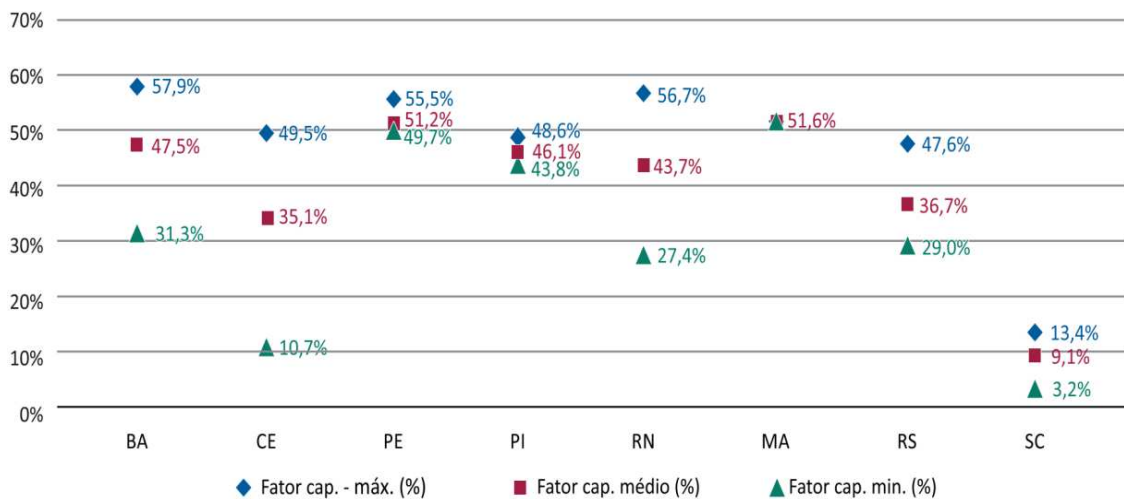


Figura 4 - Fatores de geração de energia mínimo, médio e máximo em 2018, de empreendimentos eólicos, por estado

Fonte: [Bezerra \(2019\)](#).

2.4 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Matriz energética é por definição o conjunto de todas as fontes de geração de energia ofertada ao sistema elétrico do país.

A matriz elétrica brasileira é bastante diversificada e tem colocado o Brasil em uma posição de destaque por ser composta aproximadamente por 83% de energia renovável,

ficando bem acima da média mundial que é em torno de 25%. A principal fonte geradora no Brasil ainda é a energia hidráulica que, até metade do segundo semestre de 2020 foi responsável por 59,2% da produção de energia elétrica no país e tende a ir diminuindo conforme cresce o aproveitamento da energia eólica.

Até outubro de 2020 a capacidade instalada de geração de energia eólica do alcançou 17 GW e representa 9,8% da matriz elétrica brasileira (Figura 5).

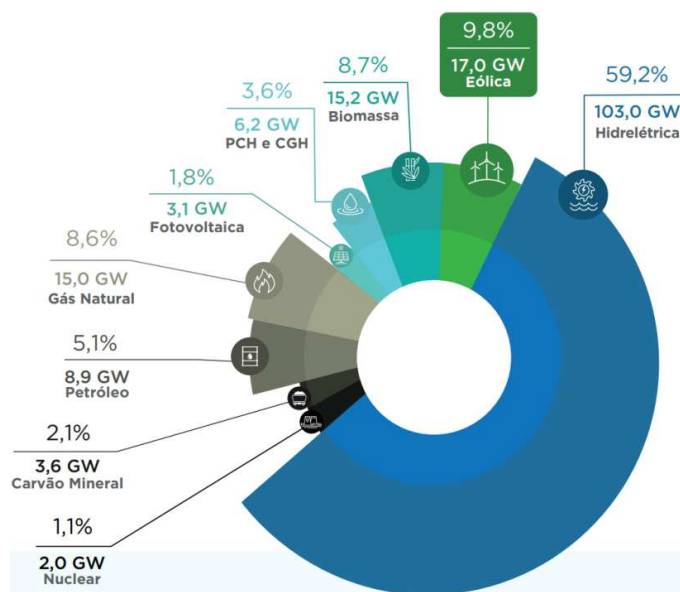


Figura 5 - Matriz elétrica Brasileira em GW. Valores referentes até o mês de outubro de 2020.
Fonte: ABEEólica (2020).

O Brasil apresenta os maiores valores médio de velocidade do vento em todo o mundo o que é uma das características fundamentais para exploração de energia eólica, outro detalhe se refere a qualidade do vento no país que é excelente, pois são ventos relativamente constantes, possuem velocidade estável e não mudam de direção com frequência. O crescimento do país nesse setor pode ser em alguns anos, o maior do mundo. Segundo Pereira, (2016) a estimativa do potencial eólico viável do Brasil *onshore* (em terra) é de 522 GW e de 1,3 TW *offshore* (no mar), para esse último, sendo a região oceânica costeira do Nordeste as áreas mais favoráveis. Em poucos anos o Brasil fará a exploração *offshore* do recurso eólico.

2.5 COMPLEMENTARIEDADE DO RECURSO EÓLICO E HIDRÁULICO

A precipitação no NEB tem sido há muito tempo, objeto de estudo. No entanto, o tema atualmente é cada vez mais relevante, já que existe uma maior conscientização da humanidade sobre os impactos globais causados por mudanças climáticas, que afetam diretamente as atividades produtivas no interior do Nordeste do Brasil, desde produções

agrícolas a produção de energia elétrica com grande participação de fontes renováveis (eólica, hidráulica e solar).

A regularidade da precipitação no Nordeste brasileiro é afetada por diversos fenômenos naturais entre os quais se destacam os eventos extremos climáticos como, por exemplo, o ENOS e a presença de anomalias de TSM no oceano Atlântico Tropical Sul. Kemenes, (2019), constata que o volume de água nos reservatórios do NEB é fortemente influenciado por processos climáticos locais e também pela presença de anomalias nos oceanos Atlântico Tropical e Pacífico Tropical. O sertão nordestino é a região mais afetada pelas secas severas. Segundo Marengo (2016) a intensidade das secas é resultado da variabilidade climática da região.

O sistema hidráulico de geração de energia elétrica necessita de uma grande quantidade de água que na maioria dos casos é armazenada em reservatórios. A energia hidráulica é diretamente influenciada pela disponibilidade de água nos reservatórios. Em períodos hidrológicos críticos decorrentes de déficit de chuvas tem-se queda significativa no nível dos reservatórios, fato esse que pode comprometer seriamente a segurança energética (Vilar, *et al*, 2020). Por outro lado, é exatamente em períodos críticos de baixos níveis dos reservatórios das hidrelétricas, em que se observam valores de velocidade do vento acima da média climatológica na região favorecendo a geração de energia elétrica através de energia eólica. Em situações como essa, os órgãos governamentais têm o papel estratégico na viabilização das condições estruturais para complementação da energia hidroelétrica através da energia eólica. O gráfico apresentado na Figura 6 mostra um exemplo dessa afirmação.

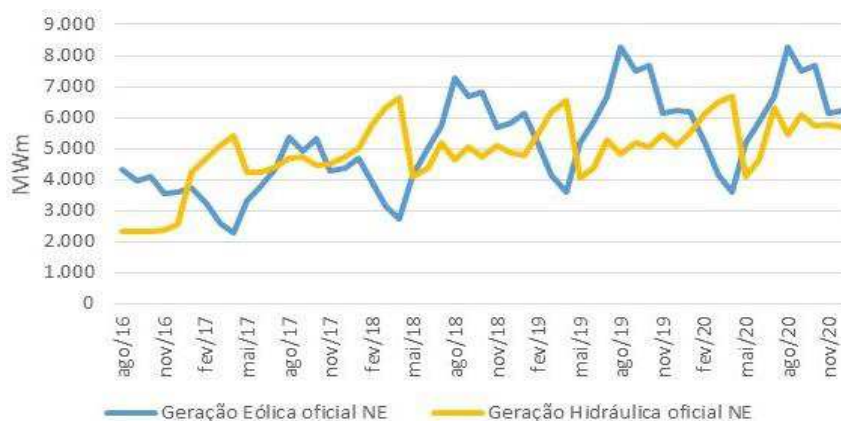


Figura 6 - Complementariedade do recurso eólico e hidráulico no NEB de agosto de 2016 até novembro de 2020.

Fonte: ABEEólica (2020).

É possível observar que de agosto de 2016 a novembro de 2020 os valores da geração eólica e geração hídrica se complementam. Nota-se que, quando os valores da geração eólica diminuem (o que normalmente está relacionado com o período chuvoso) o valor da geração hídrica aumenta, e vice versa.

2.6 DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO

A energia eólica é a fonte renovável que mais cresce no Brasil e no mundo. O maior desafio do Brasil é gerenciar a abundância dos recursos para produção de energia trazendo retornos sociais e econômicos para sociedade.

A instalação de um parque eólico além de gerar energia renovável, tem um impacto positivo na vida das pessoas das comunidades onde são instalados, pois garantem empregos diretos e indiretos, geração de renda com arrendamento de terras dos pequenos proprietários e não impacta na criação dos animais ou plantações desses proprietários. A economia local é positivamente afetada.

[Simas, \(2012\)](#), estima que são gerados 15,2 empregos-ano/ MW. Esse resultado corrobora com os dados da ABEEólica (2020), onde para cada MW instalado 15 novos postos são criados. Ainda em [Simas, \(2012\)](#), o autor ressalta que a contribuição mais significativa do setor no desenvolvimento sustentável, é a geração de empregos relacionados a construção, operação e manutenção do projeto que geram empregos permanentes nesse setor.

É importante observar também que o setor de energia eólica é multidisciplinar e envolve profissionais de diferentes áreas incluindo ciências atmosféricas com a participação desde o nível técnico ao nível superior como engenheiros ambientais, meteorologistas, pesquisadores e professores universitários. Um mapa de carreiras é apresentado na Figura 7. A iniciativa é da Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI). Ao todo são 5 áreas de atuação com 54 profissões cuja diferença varia de níveis de experiência.

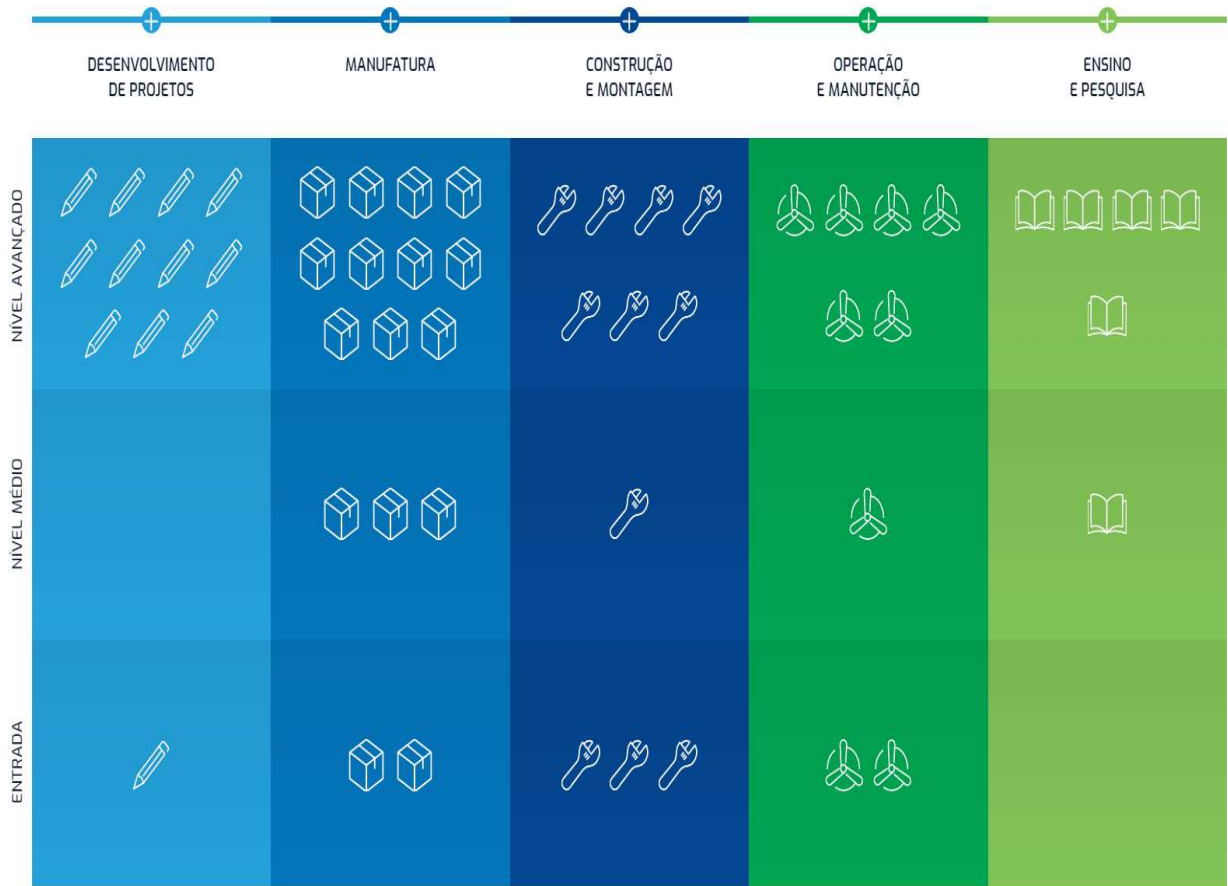


Figura 7 - Mapa de carreiras no setor de energia eólica.
 Fonte: ABDI e GO Associados (2020).

Com o elevado potencial eólico do Brasil diversos fabricantes de turbinas, pás e torres eólicas foram atraídos, onde instalaram diversas fábricas no país. A vinda desses fabricantes para o país trouxe consigo a necessidade da formação de novos profissionais nesse setor com a criação de cursos de capacitação em algumas universidades brasileiras. O mercado é promissor e necessita de mão-de-obra especializada para atuar no setor.

O investimento no setor eólico do Brasil acumula entre os anos de 2011 a 2019 um valor de 32 bilhões de dólares o que em 2020 equivale a aproximadamente 163,5 bilhões de reais. A Figura 8 contém informações com os impactos dos investimentos no setor eólico na economia das regiões nordeste e sul, que são regiões onde mais se investe em projetos para exploração de energia eólica no país especialmente na região nordeste.

Produção (R\$ milhões)	Total	Agropecuária	Indústria	Serviços
Produção direta	66.954,41	0,00	66.954,41	0,00
Produção indireta	84.510,02	480,18	47.731,52	36.298,32
Produção efeito-renda	110.770,48	7.639,32	44.617,66	58.513,50
Total	262.234,91	8.119,50	159.303,59	94.811,82
Empregos (unidades/média ano)	Total	Agropecuária	Indústria	Serviços
Empregos diretos	103.776	0	103.776	0
Empregos indiretos	132.304	3.870	33.785	94.649
Empregos efeito-renda	262.038	57.712	42.439	161.887
Total	498.118	61.581	180.000	256.536
Salários (R\$ milhões)	Total	Agropecuária	Indústria	Serviços
Salários diretos	12.892,57	0,00	12.892,57	0,00
Salários indiretos	13.614,50	73,22	5.533,98	8.007,29
Salários efeito-renda	18.709,22	1.238,17	4.796,41	12.674,63
Total	45.216,28	1.311,39	23.222,96	20.681,93
Impostos (R\$ milhões)	Total	Agropecuária	Indústria	Serviços
Impostos diretos	6.855,03	0,00	6.855,03	0,00
Impostos indiretos	5.851,09	21,71	4.178,39	1.650,98
Impostos efeito-renda	9.792,82	401,09	6.177,11	3.214,62
Total	22.498,93	422,80	17.210,53	4.865,60
ICMS diretos	3.722,47	0,00	3.722,47	0,00
ICMS indiretos	2.748,22	12,81	2.194,94	540,47
ICMS efeito-renda	5.380,84	237,14	3.915,51	1.228,19
Total	11.851,53	249,95	9.832,92	1.768,66
IPI diretos	1.155,24	0,00	1.155,24	0,00
IPI indiretos	285,37	0,20	285,09	0,08
IPI efeito-renda	535,37	2,27	533,03	0,07
Total	1.975,98	2,47	1.973,36	0,16

Figura 8 - Impactos dos investimentos no setor eólico na economia das regiões Nordeste e Sul.
Fonte: ABEEólica e MIP-IBGE (2019).

Por outro lado, apesar do impacto econômico positivo no país, inúmeros fatores dificultam de certa forma, o avanço da indústria eólica. Um dos fatores é a pandemia provocada pelo vírus COVID-19, fato esse ocorrente durante a realização dessa pesquisa, mesmo com esse empecilho, há uma grande perspectiva de crescimento no setor, pois a indústria eólica tem crescido de forma consistente nos últimos anos e ainda há muito espaço para crescimento no país.

O setor de energia eólica crescia cerca de dez por cento ao ano antes da pandemia do COVID-19. Autoridades dessa indústria, no entanto, agora temem que os projetos em fase de construção sejam interrompidos ou mesmo cancelados em decorrência da pandemia.
<<https://exame.com/negocios/como-o-coronavirus-atrapalhou-o-setor-de-energia-eolica/>>

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para alcançar os objetivos desse trabalho é necessário um conhecimento mais apurado acerca dos padrões oceânicos e atmosféricos do Pacífico e Atlântico Tropical, assim como das variabilidades climáticas associadas à relação dinâmica desses oceanos. Sendo assim, essa sessão foi elaborada com a finalidade de apresentar características importantes do ENOS e como esse fenômeno interage com o Oceano Atlântico Tropical.

3.1 PADRÕES DE VARIABILIDADE CLIMÁTICA DO PACÍFICO TROPICAL E ATLÂNTICO TROPICAL

3.1.1 El Niño Oscilação Sul (ENOS)

O El Niño Oscilação Sul (ENOS) é um fenômeno que apresenta duas componentes, uma atmosférica e outra oceânica e ocorre no oceano Pacífico equatorial. A componente atmosférica OS (Oscilação Sul) foi registrada em meados do ano de 1920, pelo matemático Sir. Walker, e revela uma correlação inversa entre a pressão atmosférica nos extremos leste e oeste do Oceano Pacífico, ou seja, quando a pressão é alta a oeste usualmente é baixa a leste e vice e versa, enquanto que a componente oceânica (El Niño/La Niña) se caracteriza por apresentar anomalias da temperatura das águas da superfície (TSM) no oceano Pacífico equatorial junto à costa da América do Sul. Em anos de El Niño, observa-se um enfraquecimento dos ventos alísios associados a Alta Subtropical do Pacífico Sul. A caracterização do ENOS é feita com base no cálculo de índices como o Índice de Oscilação Sul (IOS – calculado através da diferença de pressão entre duas regiões distintas: Taiti e Darwin). No caso da componente oceânica, os índices são calculados através das médias de anomalias de TSM nas regiões de Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4 e Niño 4 (Figura 9).

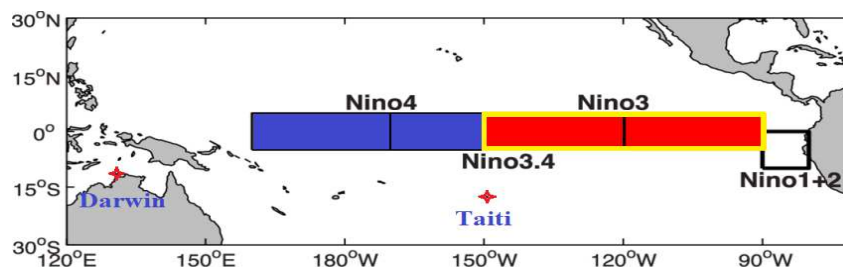


Figura 9 - Localizações dos índices Niño4, Niño3.4, Niño3 e Niño1+2. Darwin e Taiti estão marcados com um X.

Fonte: Faden, (2017).

Em atuações do El Niño, por exemplo, à medida que este se desenvolve a TSM aumenta no oceano Pacífico Tropical leste, enquanto que a pressão do ar diminui nessa região (próximo ao Taiti) e aumenta sobre a região do Pacífico ocidental (próximo a Darwin na Indonésia) onde a TSM é mais fria (Figura 10). O oposto é observado em casos de La Niña. A diferença de pressão do ar entre essas duas localidades (Taiti e Darwin) pode ser usada para calcular o índice da componente atmosférica (IOS), (INPE, 2020) (Figura 10).

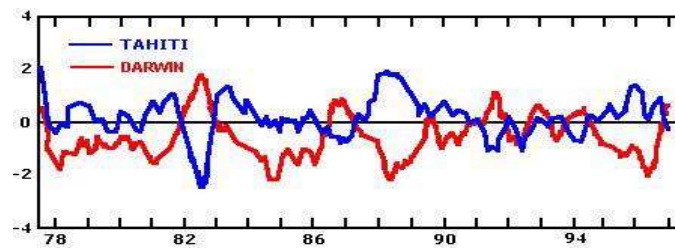


Figura 10 - Diferença de pressão do ar atmosférico entre Darwin e Taiti.

O esquema apresentado na Figura 11 ilustra o comportamento da circulação atmosférica e oceânica em condições normais.

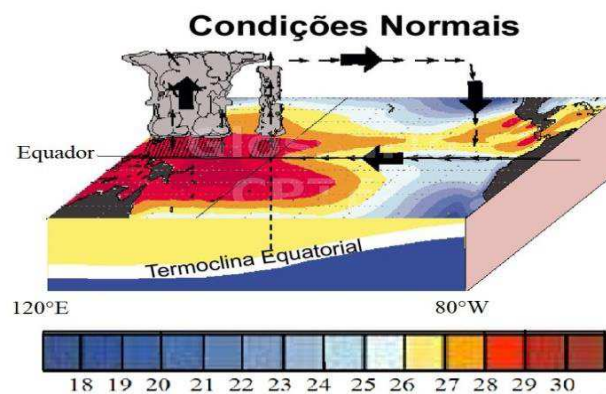


Figura 11 - Padrão de circulação observada em condições normais na região equatorial do Oceano Pacífico. Barra inferior: escala de temperatura da superfície do mar (TSM).
Fonte: Adaptado de CPTEC (2020).

O El Niño é caracterizado por anomalias positivas de temperatura da superfície do mar (TSM) na região do Pacífico Equatorial. O padrão de circulação observado com atuação do El Niño é ilustrado na Figura 12. Esse fenômeno também é chamado de fase quente ou episódio quente da anomalia e ocorre devido ao enfraquecimento dos ventos alísios que são ventos que sopra predominantemente de Leste para Oeste ao longo da região do Equador. Em condições de El Niño com o enfraquecimento dos ventos alísios há um acúmulo de água

quente na camada superior do Pacífico Tropical leste e próximo a costa oeste da América do sul. Por exemplo, o monitoramento do El Niño através do índice Niño3 que na literatura é o mais utilizado por representar bem as características do NEB (CAVALCANTI, *et al.*, 2020). É possível observar que o início desse fenômeno geralmente ocorre em meados mês de abril, tem seu pico em torno do mês de dezembro onde começa a se enfraquecer até desaparecer em média no mês de abril (Figura 13). Esse fenômeno possui tendência a ocorrer entre períodos que variam de 2 a 7 anos em média (FREIRE, 2011).

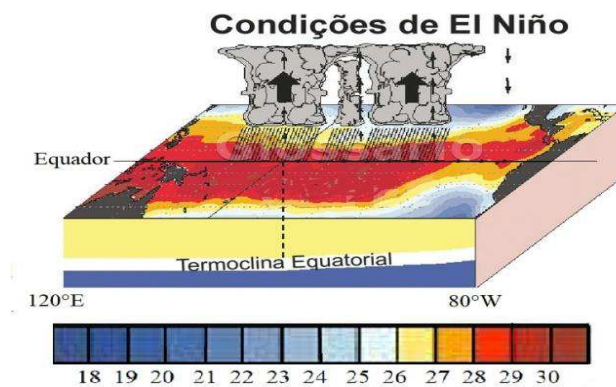


Figura 12 - Padrão de circulação observada em anos de El Niño na região equatorial do Oceano Pacífico. Barra inferior: escala de temperatura da superfície do mar (TSM).
Fonte: Adaptado de: CPTEC (2020).

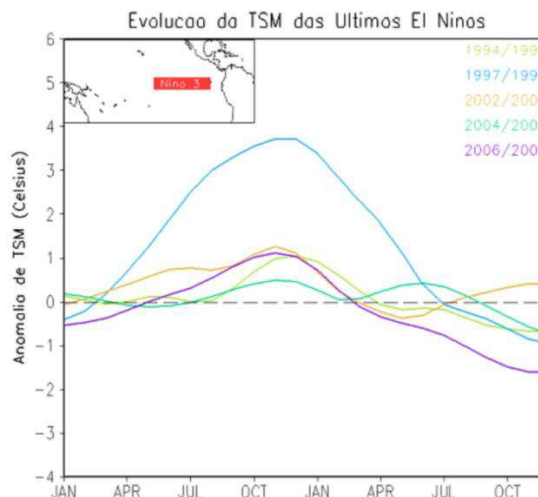


Figura 13: Evolução da TSM em episódios de El Niños de 1994 a 2007 na região do Niño3.
Fonte: CPTEC (2020).

A La Niña é caracterizada por um comportamento oposto ao fenômeno El Niño, ou seja, é caracterizado por anomalias negativas de TSM no oceano Pacífico Equatorial, por essa razão é chamada de fase fria ou episódio frio e ocorre devido ao fortalecimento dos ventos

alísios. O padrão de circulação observado em anos de La Niña é ilustrado na Figura 14. Ao contrário do El Niño, na ocorrência do fenômeno La Niña é observado um fortalecimento da Alta Subtropical do Pacífico Sul, fazendo com que o transporte de águas para o oeste da bacia do Pacífico Tropical torna-se mais eficiente.

Diferentemente do El Niño a La Niña ocorre com menos frequência que o El Niño e tem duração média entre 9 a 12 meses e inicia-se geralmente entre os meses de abril a julho, tem seu pico no mês de janeiro onde começa a enfraquecer até desaparecer em entre abril e julho (Figura 15). Na Figura 14, é possível notar a diferença entre as circulações oceânica e atmosférica em anos de ocorrência de La Niña.

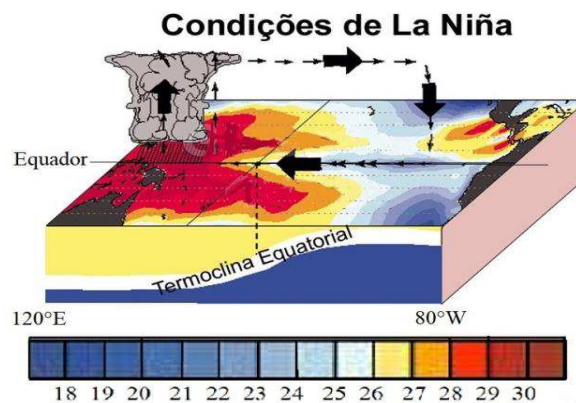


Figura 14: Padrão de circulação observada em anos de La Niña na região equatorial do Oceano Pacífico. Barra inferior: escala de temperatura da superfície do mar (TSM).
Fonte: Adaptado de: CPTEC, (2020).

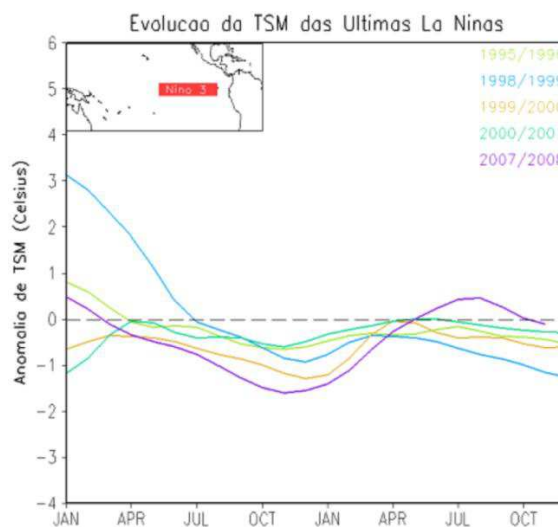


Figura 15 - Evolução da TSM em episódios de La Niñas de 1994 a 2007 na região do Niño3.
Fonte: CPTEC (2020).

3.1.2 Célula de Walker

A célula de Walker observada por Sr. Gilbert Walker em meados de 1922 a 1924, (Figura 16), é um padrão de circulação atmosférica que atua no sentido zonal (com seu ramo ascendente no Pacífico Oeste e ramo descendente no Pacífico Leste) esse padrão de circulação, pode ser perturbado em anos de ENOS, a perturbação desse padrão de circulação acarreta consequências nas variáveis meteorológicas já que essa célula é deslocada de sua posição climatológica, (FERREIRA *et al.*, 2011). Em anos de El Niño Figura 17, a circulação de Walker é deslocada para leste, com seu ramo ascendente situado no Pacífico Tropical Oriental, onde agora a convecção é aprimorada, nessa região são observados ventos relativamente mais fracos devido a convergência dos ventos, já o seu ramo descendente, nesse caso, fica situado sobre o NEB e oceanos adjacentes onde os ventos são relativamente mais fortes por se tratar de uma região de subsidência e divergência de massa. Efetivamente o que ocorre em anos de El Niño, é uma partição da célula de Walker, fazendo com que na região a oeste da América do Sul haja convecção e subsidência próximas à Austrália.

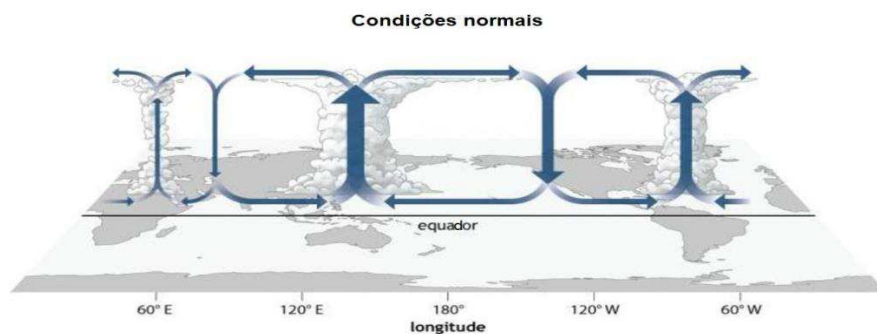


Figura 16 - Circulação da célula de Walker em condições normais
 Fonte: [Climate.gov - The Walker Circulation: ENSO's atmospheric buddy](#)

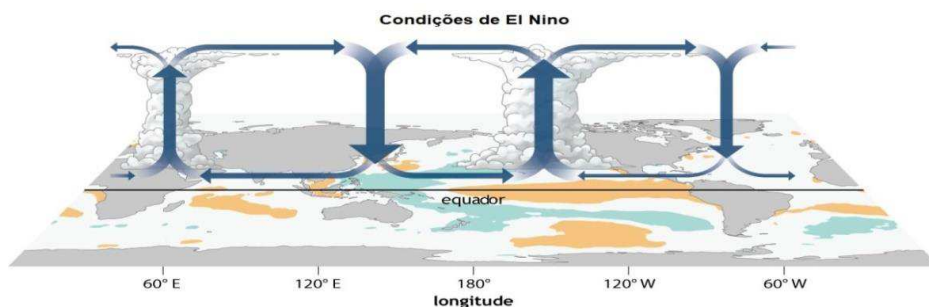


Figura 17 - Circulação da célula de Walker em condições de El Niño.
 Fonte: [Climate.gov - The Walker Circulation: ENSO's atmospheric buddy](#)

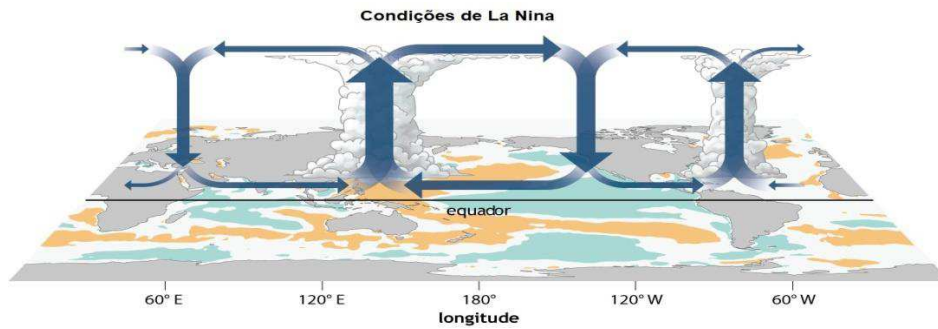


Figura 18 - Circulação da célula de Walker em condições de La Niña
 Fonte: [Climate.gov - The Walker Circulation: ENSO's atmospheric buddy](#)

Em anos de La Niña, conforme esquema mostrado na Figura 18, a região da Pacífico oeste, Austrália e norte da América do Sul ficam sob a influência do ramo ascendente da célula de Walker (que favorece a formação de nuvens). Já o Pacífico leste fica sob a influência do ramo descendente dessa célula, onde há pressão atmosférica mais elevada e inibição da formação de nuvens.

Enfim, com base no exposto existem fortes evidências da relação entre anomalias da TSM e a variabilidade da precipitação em diferentes regiões. Com base nesse indicativo espera-se que essa relação também seja detectada em relação ao vento possibilitando uma melhor compreensão e previsibilidade do potencial e geração de energia eólica.

3.1.3 Teleconexões

O termo teleconexões se refere à ligação entre anomalias climáticas locais e forçantes geralmente localizadas a grandes distâncias que são causadas devido à propagação de ondas e transporte de energia na atmosfera e nos oceanos. Angström em 1935 fez o primeiro uso reconhecido do termo teleconexão em referência ao dipolo de pressão atmosférica entre a Islândia e os Açores, hoje reconhecido por Oscilação do Atlântico Norte, entretanto o termo teleconexão só começou a se disseminar com Bjeknes em 1960 ao estudar os impactos de grande escala causados pelo ENOS. O ENOS assim como a Oscilação do Atlântico Norte, Oscilação de Madden e Julian entre outros fenômenos que fogem do escopo desse trabalho são exemplos de teleconexões. A teleconexões implicam em influências sob a variabilidade climática no NEB, e tem um controle significativo no trimestre de DJF onde em condições de El Niño, por exemplo, se o ATS estiver com anomalias negativas de TSM, podem ocorrer chuvas em toda a região do NEB e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) se desloca mais para o norte ([REBOITA e SANTOS, 2014](#)).

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi dividida em duas seções, a primeira seção tem como finalidade apresentar estudos que indicam evidências sobre a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico na variabilidade climática do NEB destacando a importância do oceano Atlântico Tropical Sul para geração dessa variabilidade. Já a segunda seção apresenta estudos que tratam dos aspectos relacionados ao vento principalmente com foco no cálculo do potencial eólico.

4.1 A INFLUÊNCIA DOS OCEANOS PACÍFICO E ATLÂNTICO TROPICAL SUL NA VARIABILIDADE CLIMÁTICA DO NEB

A maioria dos estudos que analisam a influência do Oceano Pacífico Tropical e Atlântico Tropical no clima da América do Sul atribuem a variabilidade climática à relação entre o ENOS e o Atlântico Tropical Norte, essa relação é destacada nos estudos de (HASTENRATH e CURTIS, 1995; ENFIELD e MAYER, 1997; GIANNINI *et al.* 2000 e ANDREOLY e KAYANO, 2005) e pode ser explicada através de um padrão de teleconexão. Entretanto, é documentado em alguns estudos que o Atlântico Tropical Sul é tão significativo quanto o Atlântico Tropical Norte em termos de geração de variabilidade climática e que em algumas épocas do ano, pode ser até mais significativo.

Um dos estudos pioneiros que mostram evidências mais marcantes para o ATS do que para o ATN na variabilidade da precipitação, por exemplo, é o de (SHUKLA, 1981 e KANE 1992). Em Kane (1992), o autor usando índices definidos por Servain (1991), chegou à conclusão que, as variações de precipitação em Fortaleza - CE no NEB estão mais relacionadas com a TSM do ATS do que com a TSM do ATN. Nesse sentido, Andreoli e Kayano (2007), ao analisar a importância relativa do ENOS e ATS na variabilidade de precipitação do Nordeste do Brasil encontraram resultados consistentes com os de Shukla (1981) e Kane (1992), assim mostrando a importância do ATS na geração de variabilidade de precipitação. Os resultados sugerem que em condições de El Niño juntamente com anomalias positivas de TSM no ATS chuvas acima do normal podem ocorrer na região Nordeste do Brasil enquanto que em condições de La Niña podem ocorrer chuvas abaixo do normal no norte e nordeste da América do sul. Também em Andreoly e Kayano (2006), as autoras encontraram evidências de mudanças no padrão de vento e de outras variáveis meteorológicas na região Nordeste do Brasil, ou seja, as anomalias de temperatura da superfície do mar no

Oceano Pacífico Tropical sejam elas positivas ou negativas, analisadas em concomitância com as anomalias de temperatura da superfície do mar no Oceano Atlântico Tropical Sul apresentaram evidências onde foram observadas mudanças no padrão de várias variáveis meteorológicas, incluindo o vento.

Reboita e Santos (2014), analisaram a influência de alguns padrões de teleconexões na precipitação no Norte e Nordeste do Brasil para os trimestres de DJF, MAM e SON. Os autores observaram, por exemplo, que para o trimestre de DJF, quando ocorrem episódios de El Niño concomitantemente com anomalias positivas de TSM no ATS, há déficit de chuva em todo o Nordeste brasileiro, enquanto em episódios de El Niño com anomalias negativas de TSM no ATS foram observadas excesso de chuva em toda a região, exceto no Maranhão que apresentou chuvas abaixo da média. Já na análise dos episódios de La Niña ocorrendo concomitantemente com anomalias positivas de TSM no ATS para o mesmo trimestre (DJF) todo o Nordeste brasileiro apresentou chuvas acima da média, enquanto os episódios de La Niña ocorrendo com anomalias negativas de TSM no ATS apresentaram chuvas abaixo da média. Também foram observadas mudanças significativas no padrão de chuva nos trimestres de MAM e SON quando analisada a influência relativa do Pacífico Tropical e Atlântico Tropical. Segundo os autores as anomalias de TSM no ATS parece se acoplar ao efeito das anomalias de TSM no Pacífico Tropical, fortalecendo ou enfraquecendo o sinal das anomalias de precipitação.

Ao longo do tempo, inúmeros estudos evidenciam o interesse em aprimorar cada vez mais a compreensão acerca da variabilidade climática, na região do NEB, bem como da influência relativa do ENOS e ATS no padrão climatológico de variáveis meteorológicas relevantes, tais como a precipitação e vento. Portanto, é necessário analisar com mais detalhes essas mudanças para que assim seja possível quantificá-las e ter informações mais precisas. Nesse contexto, a variável escolhida para análise neste trabalho é o vento visando a compreensão de quanto o potencial eólico do NEB pode ser afetado devido a influência relativa do ENOS e ATS. Com esse propósito, em seguida serão apresentados resultados de alguns estudos relevantes sobre o vento com enfoque principal na análise do potencial eólico.

4.2 INTENSIDADE E DIREÇÃO DO VENTO

O advento da energia eólica na diversificação da matriz energética como alternativa para minimizar impactos ambientais, o vento tornou-se uma das variáveis meteorológicas de maior destaque no cenário econômico e científico. Conforme mencionado anteriormente, o

vento é uma das variáveis que têm o seu padrão relativamente alterado pela atuação do fenômeno climático ENOS e ATS. Na literatura são vários os estudos que analisam as características do vento na região de interesse com objetivos de exploração do potencial eólico, a exemplo de (FONTENELLE, 2019).

O vento pode ser estudado de diversas formas, a mais comum é através da análise de dados coletados em estações meteorológicas já que esses seguem uma série de normas estabelecidas pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e são mais precisos, se tornando assim mais confiáveis, porém, com o avanço da tecnologia os dados provenientes de reanálise que são gerados por modelos atmosféricos estão cada vez mais confiáveis por na maioria das vezes representarem bem as características do vento na região de interesse, contudo, esses dados ainda precisam ser validados sendo comparados com dados observados.

4.2.1 Validação de dados de vento proveniente de reanálise

Nos estudos de [Stuker et al. \(2016\)](#), os autores fizeram uma comparação de dados de vento do ERA-Interim e CFSR com os dados das estações automáticas do INMET no Rio Grande do Sul através de análise estatística e mostraram que, os dados tanto do ERA-interim, quanto do CFSR, representam de forma satisfatória os dados das estações do INMET para a magnitude do vento, portanto concluíram que a utilização de reanálises para previsão de campo de vento é bastante viável.

Em um estudo recente, [Cavalcante et al. \(2020\)](#), analisaram a variabilidade da velocidade do vento observada a 10 metros de altura, para região Nordeste do Brasil e compararam com resultados obtidos com dados de vento provenientes das reanálises do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) no período de janeiro de 1979 a dezembro de 2015. O objetivo foi validar os dados de vento da reanálise. Os autores observaram um bom ajuste entre os dados observados e os dados de reanálise. Os resultados estatísticos indicaram altas correlações no nível de significância de 99,99% ($\alpha=0,01$). Ainda segundo [Cavalcante et al. \(2020\)](#), em anos de El Niño a velocidade do vento no NEB é mais intensa que o normal enquanto nos anos com influência da La Niña a velocidade do vento é menos intensa que o normal.

4.2.2 O uso de dados de vento proveniente de reanálise na estimativa do potencial eólico

Dados de vento oriundos das reanálises são usados para os mais variados fins, o uso desses dados na estimativa do potencial eólico é um exemplo. Brito (2018), desenvolveu um estudo com o vento no Nordeste do Brasil usando com base em dados de reanálises centenárias do ERA-20C. Neste trabalho o autor apresentou uma análise dos padrões da circulação dos últimos 110 anos, cujo principal objetivo foi investigar padrões de variabilidade e extremos do vento já que a produção de energia eólica vem crescendo muito ao longo da última década, principalmente nessa região. Em uma primeira análise, o autor procurou validar os dados do ERA-20C através de comparações com as reanálises mais modernas no período em comum 1980-2010. Os resultados indicaram que os dados de reanálises do vento do ERA-20C reproduziram de forma satisfatória os principais padrões presentes em outras reanálises do vento a 10 metros. O estudo permitiu observar ainda que anomalias positivas de TSM no ATS impactam mais a circulação do vento sobre o Nordeste do Brasil do que um ATN mais aquecido. Além disso foi possível verificar que o ENOS tem um impacto menor em algumas áreas do Nordeste no que diz respeito a extremos de vento, com maior impacto na costa nordeste do NEB. Por outro lado, o gradiente meridional de TSM no AT é predominante na ocorrência de extremos de ventos em todos os subdomínios do NEB. Fontenelle (2019), realizou um estudo para a avaliação do potencial eólico utilizando dados de reanálise. A autora concluiu que há vantagens em utilizar dados de reanálise para períodos de maior ou menor intensidade do vento uma vez que estes representam bem a sazonalidade.

4.2.3 Estimativa da velocidade do vento em maiores alturas

É possível determinar a velocidade do vento em diferentes alturas de duas maneiras: uma bastante difundida em análises meteorológicas que é através da lei logarítmica de Prandtl (OLIVEIRA, 2013) e a outra através da Lei de potência, (BASTOS *et al.*, 2012).

Lima *et al.* (2011) analisaram a variação da velocidade e direção do vento no município de Jaguaruana litoral cearense com o objetivo de determinar o potencial eólico da região. Os dados utilizados pelos autores foram dados provenientes de plataformas de coletas de dados (PCD) no período de janeiro de 2004 a dezembro de 2006. Os sensores da PCD são instalados a uma altura de 10m acima do solo, e para o estudo do potencial eólico costuma-se extrapolar essa velocidade medida a 10 metros para alturas ainda maiores. Neste trabalho os autores analisaram o perfil e intensidade do vento a 110 metros de altura. Nos estudos de Bastos *et al.* (2012), os autores fizeram estimativas da velocidade para de 100 metros de

altura. Nos cálculos foi utilizado o perfil logarítmico do vento. [Cunha et al. \(2012\)](#), utilizando a lei de potência estimaram a velocidade do vento em maiores altitudes e utilizaram como ferramenta de visualização o GrADS. Santos, (2014) utilizou o perfil logarítmico para estimar a velocidade do vento no NEB para altitudes de 20, 40 e 60 metros. Já Oliveira (2013), utilizou a lei de potência alegando que o perfil vertical completo é mais bem aproximado pela lei de potência.

4.2.4 Cálculo da densidade de potência eólica

O recurso eólico de uma região pode ser descrito por distribuição de frequências que fornecem características de grande importância que são necessárias para exploração desse recurso. A densidade de potência é uma das características mais importantes quando se deseja analisar a viabilidade do recurso eólico de uma região para exploração e pode ser calculada com base nos parâmetros da distribuição de Weibull. Em [Silva \(2004\)](#), o autor faz o cálculo da densidade de potência usando como base os parâmetros da distribuição de Weibull. [Lima et al. \(2011\)](#), também usaram o método de cálculo da densidade de potência através dos parâmetros da distribuição de Weibull. Outros autores como [Lima \(2011\); \(2013\); Oliveira \(2013\); Santos \(2014\)](#) usaram o mesmo método no cálculo da densidade de potência.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 ÁREA DE ESTUDO

5.1.1 Análise regional - Nordeste brasileiro (NEB)

O Nordeste brasileiro (NEB) está localizado aproximadamente entre as latitudes de 1° e 18° 30' S e longitudes de 34° 20' e 48° 30' O, limita-se ao norte e a leste com o Oceano Atlântico; compreende nove estados da Federação e compreende uma área superior a 1,5 milhão de km², (SANTOS *et al.*, 2014). Aproximadamente 900 mil km² do interior da região do NEB (sertão) são caracterizados por apresentar valores de precipitação relativamente baixos com médias pluviométricas anuais variando entre 300 a 800 mm, o que a torna uma região semiárida. Já nas regiões costeiras, os valores médios anuais de precipitação variam em torno de 1600 mm. Esta alta variabilidade de precipitação está associada a uma série de fatores, entre eles a circulação geral da atmosfera e o relevo da região.

De acordo com os dados do IBGE (2018), a população do NEB é de 56.760.780 habitantes o que corresponde a 27,2% da população Brasileira e é a região do Brasil onde mais se investe em projetos de exploração de energia eólica (ABEEÓLICA, 2020).

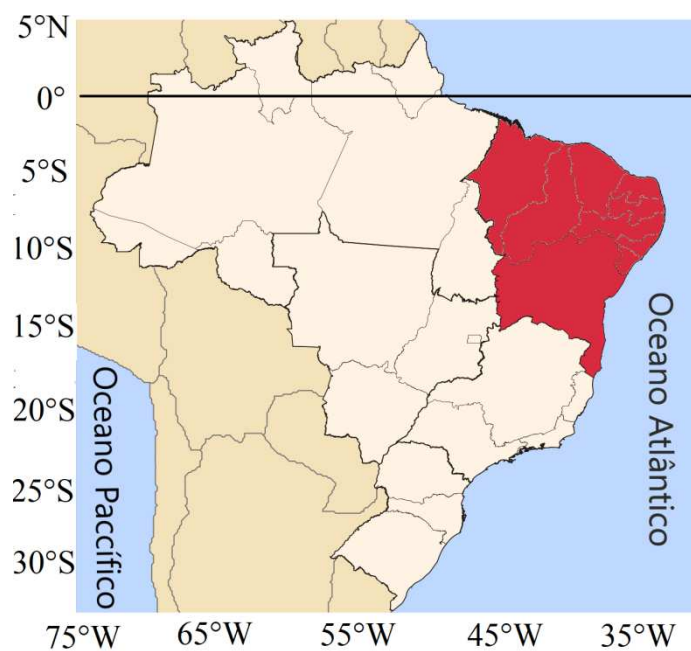


Figura 19 – Localização geográfica do Nordeste brasileiro destacado na cor vermelha.

5.1.2 Análise local - Petrolina (PE)

Situada no sertão do estado de Pernambuco no Nordeste Brasileiro na mesorregião do Rio São Francisco, o município de Petrolina (PE) ($9^{\circ}24'S$, $40^{\circ}29'W$, 370 m) se destaca devido à fruticultura irrigada que é umas das atividades econômicas de maior destaque na região, consolidando um dos maiores polos de exportação de frutas do país. O relevo da região é suavemente ondulado, com altitudes variando entre 800 e 200 metros. O clima local também é bastante influenciado pela brisa lacustre associada ao lago da Hidrelétrica de Sobradinho, cuja represa está situada a cerca de 40km do município de Petrolina (CORREIA, 2001; CORREIA *et al.* 2006). Petrolina possui uma área territorial de 4.561,870 km², população média estimada de 354.317 habitantes e densidade demográfica de 64,44 hab/km² (IBGE, 2020). O período chuvoso da região começa em meados do mês de novembro/dezembro e termina por volta de março /abril. A distribuição espacial da precipitação na região de Petrolina é resultado da interação entre o escoamento de grande escala (ventos alísios) e escoamento local gerado pelo aquecimento diferenciado nas áreas das encostas e do vale, e pela expansão da agricultura irrigada em áreas de caatinga e também do lago de sobradinho (RAMOS, 1975; CORREIA, *et al.*, 2006; CORREIA, *et al.*, 2018).

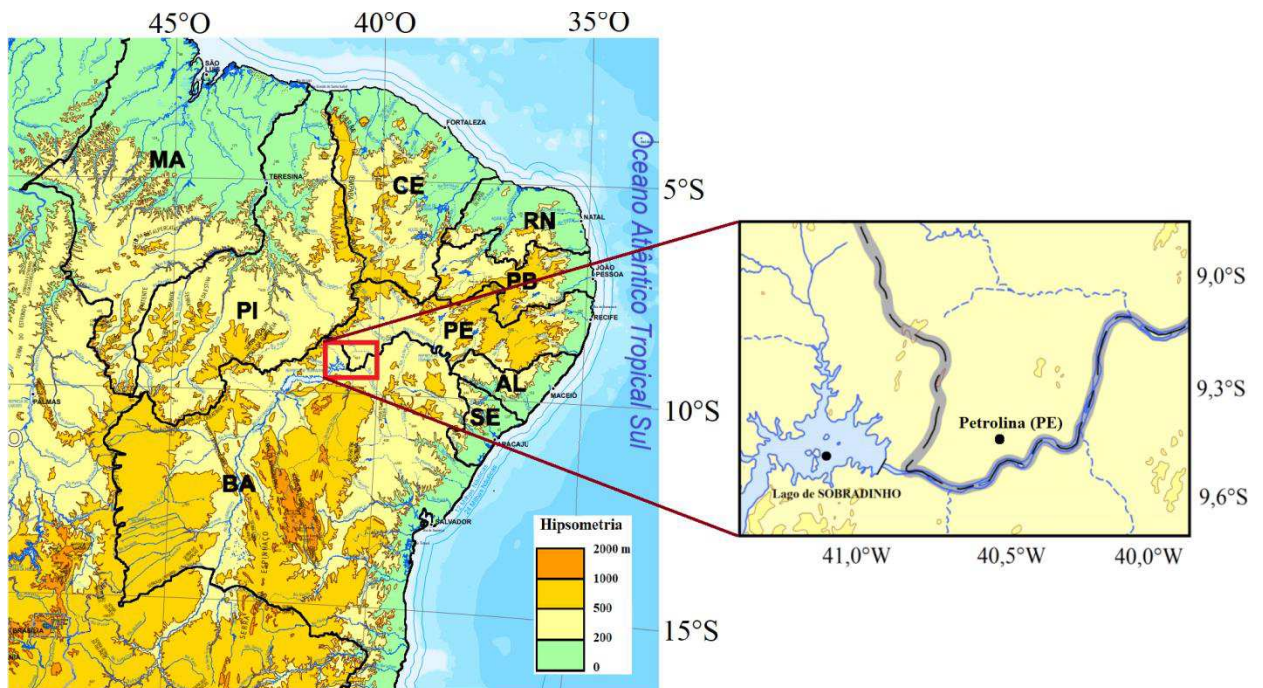


Figura 20 – Mapa hipsométrico do Nordeste do Brasil com destaque para região de Petrolina (PE).

5.3 MATERIAIS

5.2.1 Dados de reanálise com alta resolução espacial

Desde a disponibilização das primeiras séries de dados de reanálise vários estudos foram desenvolvidos para realização de avaliações de potencial eólico, muito deles usando essa fonte de dados como alternativa para suprir a ausência de dados observados. Desenvolver pesquisa a partir dos dados de reanálises tem vantagens e desvantagens. Uma aparente desvantagem, por exemplo, é que a utilização desses dados fornece apenas valores médios de uma determinada variável numa área específica já que a informação é disponibilizada em pontos de grade. Por outro lado, com o avanço tecnológico, os dados de reanálises estão cada vez mais precisos representando melhor a variável na área de interesse já que sua resolução espacial tem aumentado significativamente ao longo do tempo. Nesse sentido, as vantagens na utilização desses dados aumentam substancialmente já que são gratuitos na maioria das vezes e facilmente acessíveis. Além disso, são facilmente manuseados com ferramentas gratuitas, a exemplo do GrADS.

Resumidamente, dados de reanálise são dados provenientes de modelo cujo espaço foi dividido em pequenas caixas. Ou seja, divididos em pequenas grades horizontais e verticais que dependem de variações no tempo e espaço. Porém, trabalhar dessa forma induz a erros de truncamento e a forma de ‘reduzir’ esses erros é diminuindo o espaçamento da grade. Na Figura 21 é apresentada a ilustração de uma grade com resolução espacial de 100 km (Δx e Δy igual a 100 km). Neste caso, o valor de uma variável meteorológica qualquer, seria representado com um único valor médio dentro de uma área correspondente a 100 km x 100 km. Por exemplo, que a variável analisada seja o vento e sabendo que o mesmo pode variar bastante devido as características da região de análise, como a cobertura da terra, relevo, sistemas meteorológicos atuantes entre outros, a informação de um único valor médio para representar uma área tão extensa seria uma estimativa bastante imprecisa. Ao aumentar a resolução, ou seja, diminuir a grade, conseqüentemente o erro também diminui.

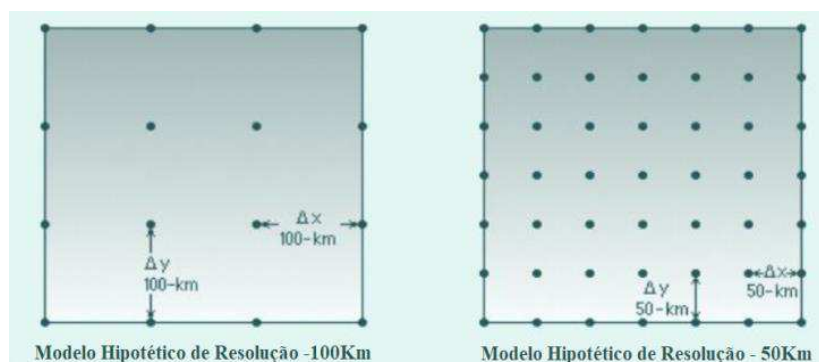


Figura 21 - Representação da resolução em pontos de grades na utilização para um modelo atmosférico.
Fonte: Adaptado de: Adilson W. Gandu (2015).

Neste trabalho foram utilizados dados de reanálises da componente zonal (u) e meridional (v) do vento para altura de 10 m, com resolução espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (9 km), ou seja, Δx e Δy igual a 9 km e resolução temporal de hora em hora. Essas componentes são combinadas para que seja extraída a intensidade do vento (V). Estes dados da componente (u) e (v) são provenientes de reanálises do conjunto de dados ERA5-Land gerados pela parceria entre *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), *European Commission*, *Copernicus eyes on Earth* e o *Climate Change Service* e fornece informações de alta resolução de hora em hora das variáveis meteorológicas sobre a superfície da terra, que são repetições do ERA-5, porém com uma resolução espacial (9 km) e com menos incertezas. É possível obter esses dados através do endereço: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp> (Dados horários ERA5-Land de 1979 até o presente). Os dados da componente (u) e (v) com resolução espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (alta resolução espacial) tem como vantagem uma melhor representação do valor médio dessas variáveis na área de estudo que se deseja analisar.

No processo de obtenção dos dados de reanálise, foi possível escolher para download as componentes (u) e (v) no horário, dia, mês, ano e local desejado. Ao solicitar dados das componentes (u) e (v) do vento para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro de um ano qualquer, o arquivo para download é um único arquivo com extensão *.nc* representando os meses selecionados e que pode ser visualizado utilizando o programa GrADS. Como os dados são horários e os meses de dezembro, janeiro e fevereiro são compostos por 31, 31 e 28 dias respectivamente, exceto se fevereiro for de um ano bissexto que nesse caso passa a ter 29 dias, o arquivo terá a componente (u) e (v) do vento em um único nível Z que é a altura de 10 m e T (tempo) igual a 2160 sendo 744 horas referente ao mês de dezembro e janeiro e 672 horas ao mês de fevereiro. Desta forma o processo de visualização e manipulação dos dados fica bem mais fácil, porém em alguns casos são observados erros de visualização, como, por exemplo, para alguns períodos a componente (u) e (v) não variava com o passar do tempo,

então para evitar esse tipo de erro, foi necessário baixar separadamente os dados mês por mês e depois uni-los com o *Climate Data Operators* (CDO) no sistema operacional Linux.

5.4 METODOLOGIA

5.3.1 Seleção de episódios nos oceanos Pacífico e Atlântico Tropical Sul

Os Episódios de El Niño e La Niña analisados neste estudo são apresentados no Quadro 1. A seleção foi feita levando em consideração os resultados de análises obtidos por [Andreoly e Kayano \(2006\)](#), Anexo 1. Em síntese, as autoras identificaram e selecionaram entre os anos de 1912 a 1999 todos os: episódios de El Niño em que simultaneamente eram observadas anomalias positivas de TSM no ATS; episódios de La Niña em que simultaneamente eram observadas anomalias negativas de TSM no ATS; episódios de El Niño e La Niña quando não eram observadas anomalias de TSM no ATS, ou seja, o ATS apresentava condições normais de TSM.

Os métodos e critérios adotados pelas autoras para identificar e selecionar cada evento de ENOS e ATS se baseou em séries temporais de anomalias de TSM observadas nos oceanos Pacífico Tropical e Atlântico Tropical Sul para o trimestre de dezembro janeiro e fevereiro (DJF) que é normalmente considerada a fase madura dos episódios de El Niño e La Niña. Os dados de TSM utilizado em seus estudos são do *Extended Reconstructed Sea Surface Temperature* (ERSST) que constituem uma série de dados de TSM entre 1854 a 2000 obtidas por Smith e Reynolds (2003). Usando a técnica dos compostos a seleção dos episódios de El Niño e La Niña se baseou no índice Niño3, (Figura 22.1), onde um episódio de El Niño foi selecionado quando a média da TSM no trimestre DJF na região do Niño3 é maior que 0,9°C e um episódio de La Niña são selecionados quando a média da TSM na região de Niño3 é menor que -0,7°C. Segundo as autoras o limiar absoluto da temperatura para os episódios de La Niña foram menores do que para os episódios de El Niño para compensar a intensidade desequilibrada entre os episódios no índice Niño3.

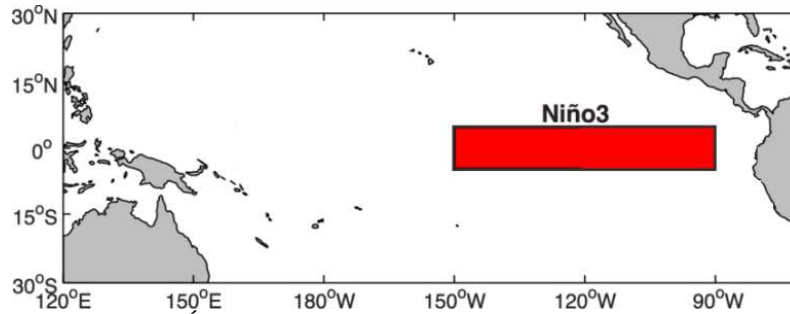


Figura 22 - Localização da área do Índice de Niño – 3.
 Fonte: Adaptado de: [Faden \(2017\)](#).

Na seleção dos episódios do ATS, ou seja, quando o ATS apresentava anomalias positivas, negativas ou condições normais de TSM, foi usado a média das anomalias de TSM na região delimitada pelo Equador, 20°S, 30°O e 10°L, (Figura 23), em que os episódios de ATS apresentando anomalias positivas de TSM foi selecionado quando a média da TSM no trimestre DJF esteve acima de um desvio padrão de 0,26°C, episódios de ATS apresentando anomalias negativas de TSM foi selecionado quando a média da TSM no trimestre DJF esteve abaixo de um desvio padrão de 0,26°C e episódios de ATS neutro foi selecionado quando não foram observadas anomalias de TSM no ATS.

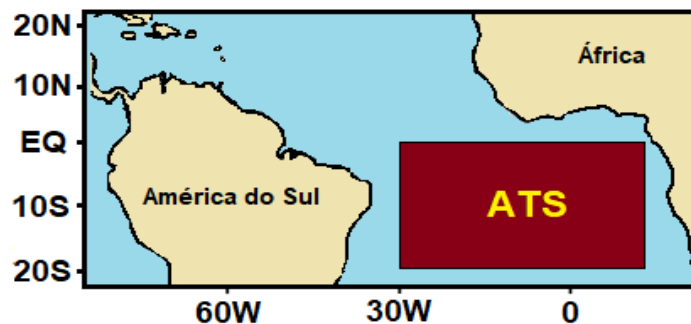


Figura 22.1 - Localização geográfica do local de onde foram analisadas as anomalias de TSM no Atlântico Tropical Sul para os ‘episódios no ATS’.
 Fonte: Elaborado pelo Autor.

Uma vez identificado os episódios de ENOS e do ATS que ocorreram entre os anos de 1912 a 1999 as autoras selecionaram apenas episódios de: El Niño em que simultaneamente eram observadas anomalias positivas de TSM no ATS; os episódios de La Niña em que simultaneamente eram observadas anomalias negativas de TSM no ATS; os episódios de El Niño e La Niña quando não eram observadas anomalias de TSM no ATS. Segundo as autoras, não foram selecionados episódios de El Niño com anomalias negativas de TSM no ATS e La Niña com anomalias positivas de TSM no ATS devido ao baixo número de ocorrência desses eventos, não sendo o suficiente para aplicar a técnica dos compostos. Neste trabalho serão

analisados apenas os episódios que ocorreram entre os anos de 1980 a 2000, o motivo dessa escolha será esclarecido mais adiante.

Os episódios de ENOS com e sem a influência das AATS serão classificadas conforme a Quadro 1:

Quadro 1: Abreviatura dos episódios analisados.

ENOS com e sem a influência das AATS	Abreviatura
El Niño ocorrendo simultaneamente quando são observadas anomalias positivas de TSM no ATS	ELcomAATS
El Niño ocorrendo simultaneamente quando não são observadas anomalias de TSM no ATS	ELsemAATS
La Niña ocorrendo simultaneamente quando são observadas anomalias negativas de TSM no ATS	LAcumAATS
La Niña ocorrendo simultaneamente quando não são observadas anomalias de TSM no ATS	LAsemAATS

Fonte: Elaborado pelo autor.

No Quadro 2, com a abreviatura que será utilizada, são selecionados os anos dos episódios que serão analisados nesse trabalho .

Quadro 2: Episódios de El Niño/La Niña e Atlântico Tropical Sul Quente/Frio ocorrendo simultaneamente (ELcomAATS e LAcumAATS), episódios de El Niño/La Niña e Atlântico Tropical Sul apresentando condições normais de TSM (ELsemAATS e LAsemAATS). Seleção realizada entre 1980 a 2000.

ELcomAATS	ELsemAATS	LAcumAATS	LAsemAATS
1982 - 1983	1986 - 1987	1996 - 1997	1988 - 1989
1997 - 1998	1991 - 1992		1998 - 1999

Fonte: Elaborado pelo autor

O período escolhido para realização da análise de intensidade do vento (V) apresentadas nesse estudo foi de 1980 até 2000. O objetivo é analisar os impactos na intensidade do vento sobre o NEB e as características do vento na cidade de Petrolina (PE) causados pelo efeito do ENOS sob a condição de influência ou não das anomalias de TSM no Atlântico Tropical Sul (AATS), dentro do período de 1980 a 2000.

A escolha do período entre os anos de 1980 a 2000 para as análises realizadas nesse estudo levou em consideração dois critérios, o primeiro critério: ainda que, antes de 1980, tenham sido identificados outros episódios de ELcomAATS, ELsemAATS, LAcumAATS e LAsemAATS como mostra o Anexo 1, no site <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp> (de

onde foram extraídos os dados utilizados nesse estudo) são disponibilizados apenas os dados a partir de 1979; segundo: como a seleção dos episódios do Quadro 2 foi baseada nos estudos [Andreoly e Kayano \(2006\)](#), então, procurou-se, para fins de comparação e validação dos resultados, escolher o período até 2000. Levando em consideração o exposto, foram selecionados nesse estudo apenas os episódios de ELcomAATS, ELsemAATS, LcomAATS e LAssemAATS que ocorreram dentro do período entre os anos de 1980 a 2000. Vale ressaltar que a análise será feita para o trimestre de DJF, pois todos os episódios do Anexo 1 assim como os do Quadro 2 são episódios identificados nesse trimestre.

5.4.2 GrADS - *Software Grid Analysis and Display System*

Para visualização e manipulação dos dados de reanálises desse trabalho foi utilizado o *Software Grid Analysis and Display System* (GrADS). A utilização das ferramentas disponibilizadas neste programa permitiu o processamento dos dados de reanálises, cálculo de variáveis e elaboração dos mapas da distribuição espacial da intensidade do vento para todo o NEB.

5.4.3 Processamento dos dados

Os dados de intensidade do vento sobre o NEB foram retirados do GrADS e transferidos para uma planilha *Excel* para que fossem feitos cálculos e gráficos.

5.4.4 Distribuição espacial da intensidade do vento a 10 m em todo o NEB

Nesta etapa, foram construídos para todo o NEB, mapas com a distribuição espacial das anomalias de intensidade média do vento no trimestre de DJF em cada um dos episódios selecionados no Quadro 2, que são, separadamente os anos em que ocorreram episódios de: ELcomAATS, ELsemAATS, LcomAATS e LAssemAATS. Para esse propósito foi feito o seguinte: Dos valores de intensidade do vento observados em cada um desses episódios foi retirada a média dos valores de velocidade do vento observado no período de 1980 a 2000 no mesmo trimestre, para destacar as anomalias de intensidade do vento por todo o NEB durante a atuação desses fenômenos. Esta etapa teve como objetivo identificar as regiões que são mais favoráveis para exploração do potencial eólico durante a atuação de cada episódio no

trimestre DJF que é considerado o trimestre com menores valores de velocidade do vento nessa região.

5.4.5 Características do vento no local de análise

5.4.5.1 Direção Predominante do vento em Petrolina (PE)

Os dados utilizados para a análise local são do ponto de grade cujas coordenadas são iguais às da estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Na análise da direção do vento em Petrolina-PE, para o trimestre DJF, em períodos de atuação do ENOS com e sem a influência das AATS foram determinadas a direção predominante e a média no período de 1980 a 2000. O objetivo dessa análise foi verificar possíveis alterações do padrão predominante do vento na região de Petrolina causadas pelos eventos considerados. No estudo foi utilizado o programa *View Wind Rose Plots for Meteorological Data* (WRPLOT). A utilização dessa ferramenta possibilita utilizar dados meteorológicos construir gráficos visuais de rosas dos ventos para análise de frequências. A rosa dos ventos permite representar a frequência de ocorrência de ventos em cada um dos quadrantes (norte, sul, leste e oeste) com classes de velocidades para um determinado local e período.

5.4.5.2 Ciclo diário da intensidade do vento em Petrolina (PE) para cada um dos meses no trimestre DJF

Na caracterização do potencial eólico e aproveitamento da energia eólica é importante considerar as características fisiográficas da região analisada tais como relevo e cobertura vegetal. Em muitas situações a variação da temperatura do solo e/ou da atmosfera são aspectos relevantes em escala local e podem influenciar de forma substancial a intensidade e direção do vento. Nesse contexto, essa etapa do trabalho teve como objetivo analisar a evolução temporal da intensidade do vento em Petrolina (PE) em período sob atuação do ENOS com e sem a influência das AATS para cada um dos meses no trimestre DJF. O valor médio horário da intensidade do vento a 10 metros Petrolina (PE) para cada episódio foi comparado com o valor médio do período de 1980 a 2000.

A localidade de Petrolina (PE) foi escolhida para essa análise por ser relativamente próxima de parques eólicos em atividade, além de representar uma região com alto potencial de produção de energia eólica (SANTOS *et al.*, 2019). A região também se destaca em função

de suas características peculiares, entre elas é possível citar: a influência que o lago de sobradinho exerce na circulação local e o relevo que é suavemente ondulado. Esta análise permite fazer uma avaliação da evolução temporal da intensidade do vento em cada um dos meses do trimestre para assim ter uma ideia mais acurada do quanto o ENOS com e sem a influência do AATS em cada mês analisado impacta na intensidade do vento da localidade e consequentemente do potencial eólico da região.

5.4.5.3 Ciclo diário da intensidade do vento nas alturas de 10 m, 25m, 100 m e 150 m em Petrolina-PE

O cálculo do ciclo diário da intensidade do vento para a altura de 25 m na Figura 36a, 36b, 36c, 38a, 38b e 38c, foi feito apenas com o objetivo de mostrar a semelhança quando comparado com os resultados do ciclo diário em Petrolina-PE obtidos por [Melo et. al. \(2013\)](#).

Nessa etapa será analisada a média da evolução temporal da intensidade do vento no trimestre DJF e para as alturas de 10 m, 25m, 100 m e 150 m com o objetivo de avaliar o perfil vertical do vento nesse trimestre e mostrar quais foram as principais diferenças durante o período de atuação dos episódios e quais indicaram ser favoráveis para exploração de energia eólica.

5.4.6 Perfil Vertical do Vento

Na avaliação do potencial eólico de uma região, é importante conhecer a velocidade do vento na altura dos aerogeradores. Com o avanço da tecnologia e a demanda do mercado de energias renováveis os aerogeradores estão sendo colocados a alturas cada vez maiores conforme ilustração apresentada na Figura 23.

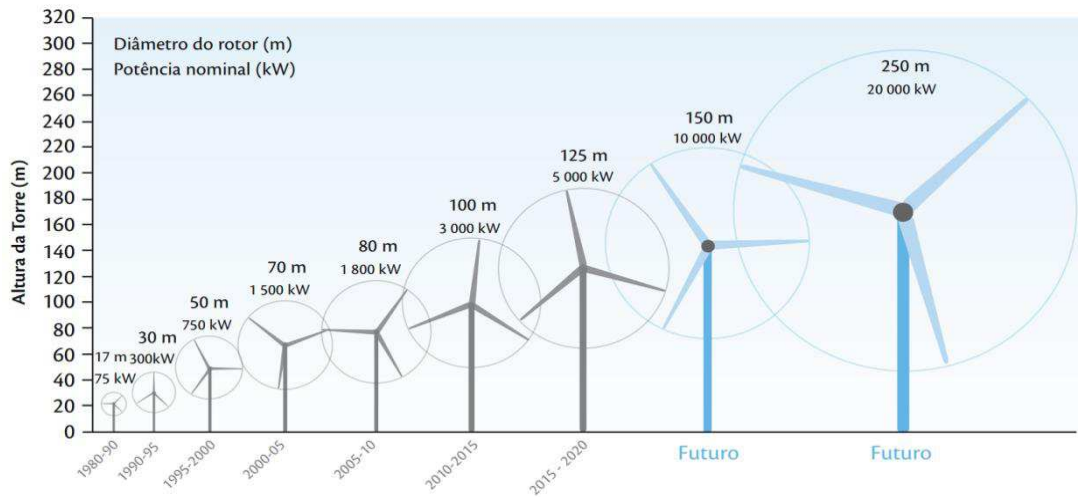


Figura 23 - Evolução das alturas dos aerogeradores.
Fonte: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) (2015).

Como geralmente as medições de velocidade do vento são feitas à altura de 10 metros em relação ao solo, é necessário estimar essa velocidade para alturas maiores. No entanto, é importante ressaltar os regimes de vento na CLA (camada limite atmosférica) são influenciados tanto por características locais, como a topografia e rugosidade da superfície (cobertura e uso solo) como por sistemas atmosféricos sinóticos e de mesoescala.

Existem algumas maneiras de estimar a velocidade do vento em maiores alturas, as mais comuns são: através do Perfil Logarítmico ou a Lei de Potência. Deste modo o perfil Logarítmico do vento pode ser obtido pela expressão 1:

$$V_z = V_{zr} \cdot \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \quad (1)$$

em que:

V_z = Velocidade média na altura que se deseja saber a velocidade do vento

V_{zr} = Velocidade média na altura de referência

z = Altura desejada

z_r = Altura de Referência

z_0 = Comprimento da rugosidade do solo

Já com a Lei de Potência a expressão fica:

$$\frac{V_z}{V_{zr}} = \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (2)$$

em que os termos V_z , V_{zr} , z e z_r são os mesmo que foram mostrados para o Perfil Logarítmico e α é o expoente de camada limite e que varia de acordo com a rugosidade da superfície do local. Nesse estudo, a estimativa dos valores de intensidade do vento para os níveis de 100 m e 150 m foi feita usando a expressão logarítmica onde se levou em consideração a rugosidade de 0,03m, $Z_0 = 0,03m$.

5.4.7 Tratamento probabilístico do vento

Existem diversas formas para representar as características do vento em uma região, seja mediante probabilidade ou de forma discreta. No aproveitamento do potencial eólico é importante conhecer a velocidade média do vento na região de interesse assim como a frequência de ocorrência dessa velocidade no tempo. Em outras palavras, ter conhecimento de quanto tempo o vento se mantém a uma determinada velocidade, [Seye \(2017\)](#).

Devido à natureza estocástica do vento em um curto período de tempo, é necessário o tratamento probabilístico dessa variável para que sejam identificadas as características do vento na região de interesse. Sendo assim, o vento pode ser tratado como uma variável aleatória e continua em um determinado período que pode assumir qualquer valor. Dessa maneira, podemos abordar o vento por meio da função de densidade de probabilidade (FDP) que, utiliza a média e o desvio padrão em seu cálculo.

A média de uma variável aleatória qualquer pode ser dada pela expressão 3:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

em que n é o número de dados da amostra.

O desvio padrão da amostra pode ser obtido pela expressão 4:

$$\rho = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n x_i (x_i - \mu)^2} \quad (4)$$

O desvio padrão indica qual é a variação dos dados e torno da média desses dados.

Entre todas as FDPs, a que normalmente é utilizada para análise das características do vento de uma determinada região é a FDP de Weibull.

Na literatura inúmeros estudos mostram que a FDP de Weibull é a mais adequada para descrever o regime dos ventos para fins de exploração de do potencial eólico, estudos como o de (SANTOS, 2014), destaca essa afirmação.

A representação matemática da função de densidade de probabilidade (FDP) de Weibull é dada pela expressão 5:

$$f(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \exp\left\{-\left[\left(\frac{u}{c}\right)^k\right]\right\} \quad (5)$$

em que c é o fator de escala e possui dimensão de velocidade do vento, k é o parâmetro de forma sendo adimensional e u é nesse caso a velocidade média do vento. Uma vez obtidos os parâmetros c e k pode-se analisar as frequências de distribuição do vento e assim através da distribuição de Weibull calcular o potencial eólico ou a densidade de potência eólica na região de interesse.

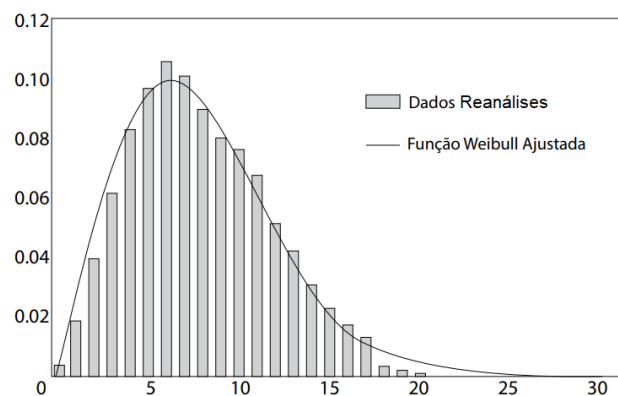


Figura 24 - A Figura ilustra um exemplo de uma FDP de Weibull.
Fonte: Fontenelle (2019).

O fator de forma k determina a forma da curva na Figura 25.1 e indica a variabilidade dos ventos, ou seja, durante quanto tempo o vento se mantém a uma determinada velocidade. Quanto maior o valor de k maior será a regularidade do vento em termos de velocidade e mais estreita será a curva da distribuição FDP de Weibull, (Figura 25.2).

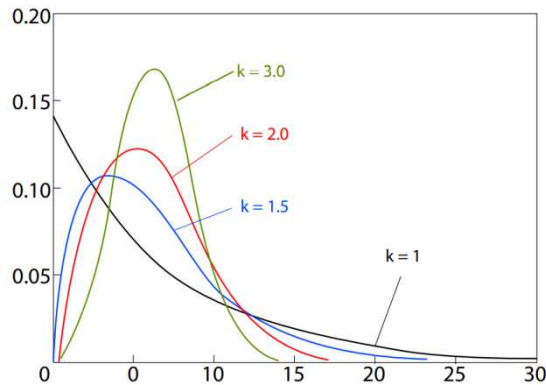


Figura 24.1 - Função de densidade de probabilidade de Weibull com k variando.
Fonte: Fontenelle (2019).

Podem ser encontrados na literatura, inúmeros métodos de se estimar os parâmetros c e k da distribuição de Weibull. Nesse estudo foi utilizado o método de estimativa de c e k que depende do desvio padrão σ_v e velocidade média do vento (V_m) por ser um método bastante difundido na literatura. Esse método é amplamente utilizado em estudos semelhantes (CALDAS, 2010; OLIVEIRA, 2013 e TUCHENHAGEN, 2013) e consiste em obter o parâmetro de forma k através da expressão 6:

$$k = \left(\frac{\sigma_v}{V_m} \right)^{-1,086} \quad (6)$$

em que σ_v é o desvio padrão do vento e V_m é a velocidade média do vento. Depois de obtido o parâmetro k , o parâmetro de escala c poderá ser estimado pela expressão 7:

$$c = V_m \cdot \left(0,568 + \frac{0,433}{k} \right)^{-1/k} \quad (7)$$

A distribuição de Weibull foi utilizada nesse estudo para analisar a distribuição de frequências de ocorrências da velocidade do vento e, em seguida, estimar a densidade de potência eólica da região de Petrolina-PE em diferentes níveis de altitude. Nesta etapa foi estimada a densidade de potência eólica na cidade de Petrolina (PE) durante o período de atuação dos: ELcomAATS ELsemAATS, LcomAATS e LAssemAATS no trimestre DJF, e comparado com a densidade de potência eólica do período de 1980 a 2000 no mesmo trimestre. O objetivo foi mostrar o quanto o ENOS com e sem a influência das AATS impacta no potencial eólico da cidade de Petrolina (PE).

5.4.8 Estimativa da densidade de potência eólica

A densidade de potência eólica em Petrolina-PE durante a atuação dos eventos e no período de 1980 a 2000 foi calculada para as altitudes de 10 m, 100 m e 150 m. Nesta etapa, a distribuição de velocidade do vento foi ajustada a distribuição de Weibull e a partir desse ajuste foi feito o cálculo da densidade de potência eólica em W/m². A densidade de potência eólica é uma característica muito importante e independente do aerogerador instalado. Para o cálculo da densidade de potência eólica foi utilizada a expressão 8:

$$P(u) = \frac{1}{2} \rho u^3 \quad (8)$$

Em que u é a velocidade instantânea e ρ é a densidade do ar que varia de acordo com a temperatura e altitude no local que se deseja realizar um estudo dessa natureza, mas normalmente se usa o valor médio de $\rho = 1,225$ (Kg/m³).

5.4.9 *Box-plot* - Análise e interpretação de dados quantitativos

O *box-plot* é um recurso gráfico bastante utilizado em pesquisas científicas geralmente aplicado para análises exploratória dos dados e detecção de *outliers*. A análise dos dados quantitativos por meio de *box-plot* é feita de forma visual em que resume os dados para exibir a mediana, quartis e valores pontuais mínimos e máximos. Desta forma, com os dados analisados é possível observar se há tendência, dispersão e simetria dos dados agrupados (VALLADARES NETO *et al.*, 2017).

Ainda em Valladares Neto *et al.* (2017), as informações contidas no *box-plot* podem ser interpretadas de maneira que, é possível observar a tendência central não-paramétrica desses dados, ou seja, a mediana, dispersão dos dados, observando-se o quartil inferior (Q1) e o quartil superior (Q3), forma de distribuição dos dados em torno da média ou simetria da amostra (valores pontuais mínimo e máximo), valores atípicos (*outliers*) e extremos (Figura 24.2).

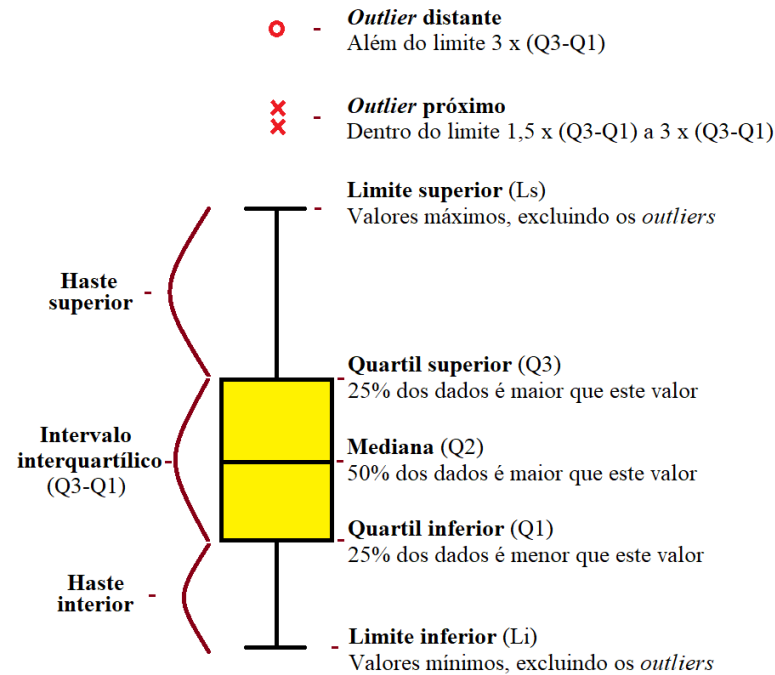


Figura 24.2 – Informações contidas no *box-plot*.
Fonte: Elaborado pelo autor.

A mediana é o centro da distribuição dos dados então indica a assimetria dos dados, ou seja, uma amostra de dados tem distribuição simétrica se há o mesmo número de dados em ambos os lados da mediana.

O Q1 é o primeiro quartil ou quartil inferior e corresponde a 25% dos dados da amostra, é onde se localiza os menores valores. O Q3 é o terceiro quartil ou quartil superior e corresponde a 75% dos valores. O Intervalo interquartilico (IIQ) é a diferença de Q3 e Q1 ($Q3-Q1$) e representa o intervalo de 50% dos dados em torno da mediana. Os valores pontuais, ou seja, valores mínimos e máximos da amostra denominados Limite inferior (*L-inf*) quando os mínimos valores são até 1,5 vezes o IIQ e Limite superior (*L-sup*) quando os valores máximos são até 1,5 vezes o valor do IIQ.

Outliers são dados com valores que se diferenciam significativamente de todos os outros. Em outras palavras, são valores considerados atípicos que podem causar um viés a uma série de dados. Em muitas ocasiões são causados por erros no processo de medições. Porém, nem sempre os *outliers* são motivos de preocupação, já que podem ser valores que, por alguma razão são muito diferentes dos demais valores. Um evento extremo na meteorologia, por exemplo, pode resultar em *outliers*.

O *Box-plot* pode ser construído por meio de diversos *softwares* incluindo o *Excel* programa esse que será utilizado nesse trabalho para construção de *box-plot* para interpretação dos episódios analisados.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desenvolvimento deste trabalho partiu da premissa de que variações significativas no padrão de ventos do NEB podem resultar de um efeito conjunto de anomalias da TSM do Atlântico Tropical Sul e das anomalias da TSM no Pacífico Tropical. As análises apresentadas nesta pesquisa são para o trimestre DJF (dezembro, janeiro e fevereiro) entre os anos de 1980 a 2000, para todos os episódios de ENOS que ocorreram quando o Oceano Atlântico Tropical Sul apresentou anomalias positivas, negativas ou neutras da TSM.

6.1 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA INTENSIDADE MÉDIA DO VENTO A 10 METROS EM TODO O NEB

A distribuição espacial da intensidade média do vento no Nordeste brasileiro obtida no período de 1980 a 2000 é apresentada na Figura 25. É possível observar que no trimestre DJF (Verão no hemisfério sul), o setor oeste do NEB apresenta os menores valores de intensidade do vento (entre 1 e 2 m/s). De maneira inversa no leste do NEB verifica-se, em média, os maiores valores de velocidade do vento, com intensidade moderada variando entre 3 e 4,5 m/s.

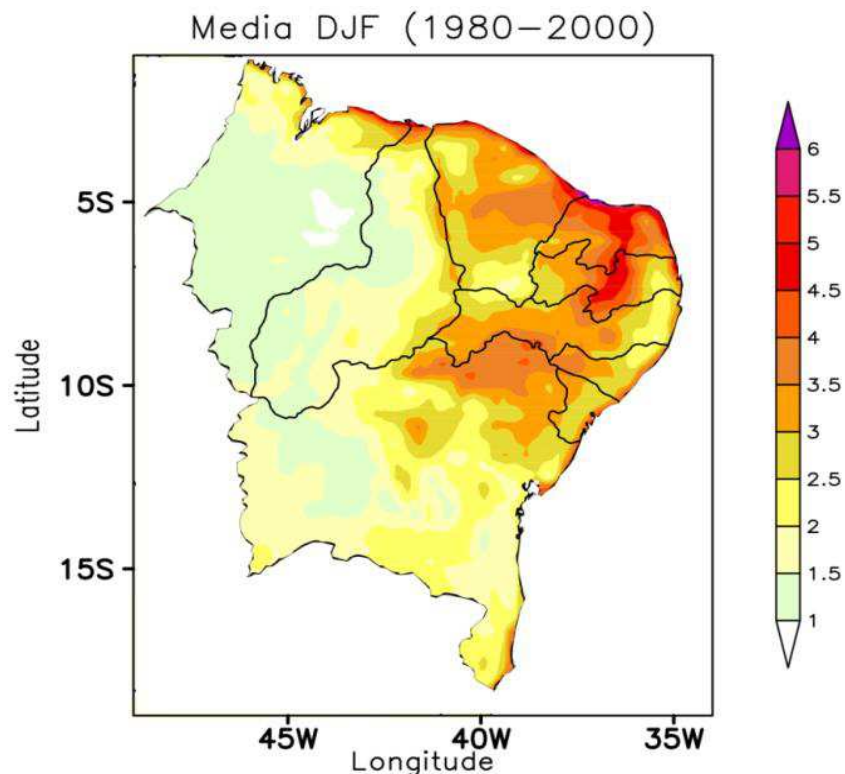


Figura 23 - Distribuição espacial da intensidade do vento (m/s) sobre o NEB para o trimestre de DJF. Média dos valores entre os anos de 1980 a 2000

A intensidade dos ventos alísios de sudeste está diretamente associada ao anticiclone subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Nesse período (DJF), o vento associado a esse sistema está relativamente mais fraco se comparado aos valores verificados em outros trimestres (MAM – março, abril e maio; JJA – junho, julho e agosto e SON - setembro, outubro e novembro). Por esse motivo os ventos alísios de nordeste se sobrepõem aos ventos alísios de sudeste e resulta em maiores valores de velocidade do vento.

Essa relação é claramente observada na faixa litorânea do Rio Grande do Norte e Ceará (local de maior influência dos ventos de nordeste durante esse período). Em consequência, os ventos alísios de nordeste ao atingir o interior do Rio Grande do Norte e Paraíba, é possível verificar picos de intensidade do vento em torno de 4,5 a 6,5 m/s indicando a relação com a orografia da região, ou seja, a influência do relevo nesta região (serra da Borborema).

6.2 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA DIFERENÇA DE INTENSIDADE DO VENTO NO NEB

6.2.1 Média do El Niño com Anomalias da TSM no Atlântico Sul (ELcomAATS)

A distribuição espacial da diferença entre a intensidade do vento (m/s) observada em episódios de ELcomAATS e no período de 1980 a 2000 é apresentada na Figura 26.

É possível observar na Figura 26a (EL Niño de 1982-1983) que há anomalias positivas de intensidade do vento em praticamente todo o NEB com valores acima de 0,7 m/s na divisa do Piauí e Ceará (serra da Ibiapaba). Verifica-se também valores mais altos ao longo da costa norte e do nordeste do estado do Maranhão. Valores acima de 0,5 m/s foram observados em praticamente todo o estado do Ceará. Algumas regiões nos estados do Maranhão setor norte, Paraíba e Rio Grande do Norte setor oeste e Piauí setor leste foram observadas anomalias com valores acima de 0,5 m/s. Valores acima de 0,7 m/s são observados no extremo oeste da Paraíba.

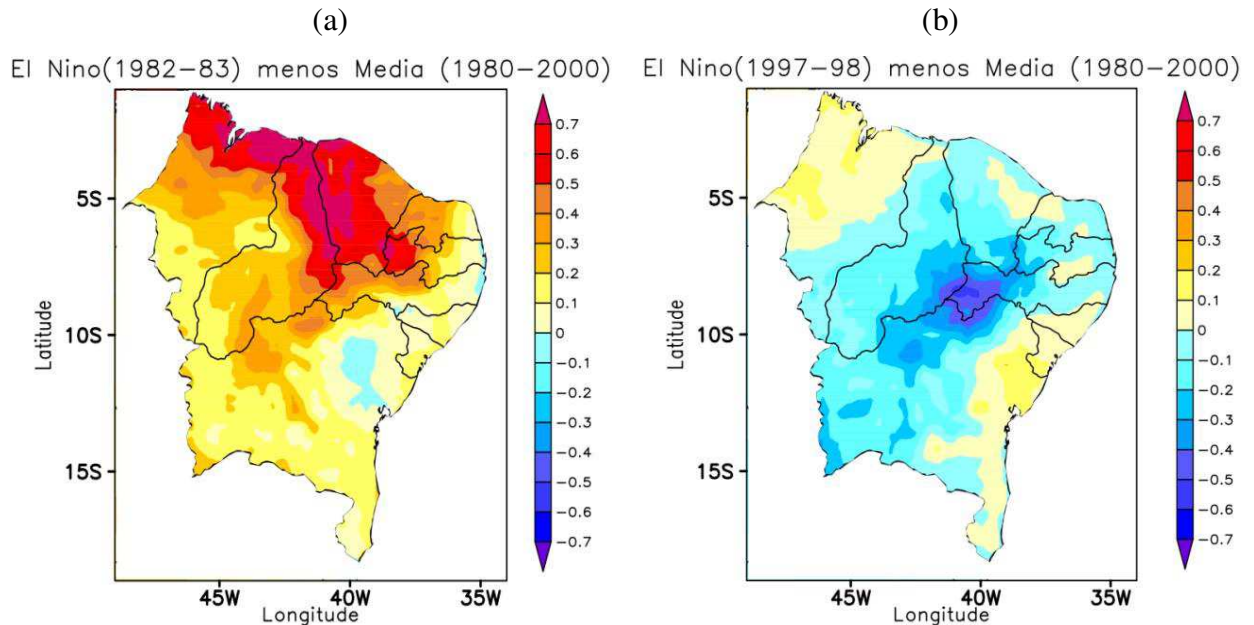


Figura 24 - 26a e 26b – Distribuição espacial da diferença entre a intensidade média do vento (m/s) em episódio de ELcomAATS e a média do período de 1980 a 2000, para o trimestre DJF: **a)** El Niño de 1982 – 83; **b)** El Niño de 1997 – 98.

Na Figura 26b - (EL Niño de 1997-1998) são observadas anomalias positivas em partes dos estados da Paraíba, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Ceará, embora com valores relativamente baixos. Os estados de Sergipe, Alagoas e Maranhão apresentam anomalias positivas em quase todo seu território. Um núcleo com valores de 0,7 m/s de anomalias negativas de intensidade do vento foi observado no extremo norte da Bahia divisa com Pernambuco e Piauí.

Um resultado interessante dessa análise pode ser visto a partir da comparação entre os mapas apresentados na Figura 26. Ambos os episódios de El Niño, (1982–83) e (1997–98), são considerados como de intensidade forte. No entanto, apesar dessa característica e de ambos os eventos estarem sob influência de anomalias positivas de TSM no ATS (ATS está mais aquecido), a distribuição espacial de anomalias, são bastante diferentes.

No caso do El Niño de 1982–1983 (Figura 26a), observam-se anomalias positivas de velocidade do vento em todo o NEB enquanto no El Niño 1997–1998 é possível observar anomalias negativas de velocidade do vento na maior parte do NEB. O El Niño de 1997–1998 atingiu o maior valor já registrado de TSM durante o século XX, maior até mesmo que os valores registrados no El Niño de 1982 - 1983 que até então era considerado o episódio mais intenso já registrado.

6.2.2 Média do El Niño sem Anomalias da TSM no Atlântico Sul (ELsemAATS)

Valores negativos de anomalias de intensidade do vento foram observados em grande parte da Bahia e na costa leste da Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte (Figura 27a – EL Niño de 1991-1992). Na Figura 27b (EL Niño de 1986 -1987) quase não há anomalias negativas de intensidade do vento, algumas com valores relativamente baixos foram observados no extremo leste de dos estados de Pernambuco e Alagoas e também no sudoeste da Bahia. Segundo [Carvalho *et al.* \(2013\)](#), o El Niño 1991 – 1992 foi considerado um evento de intensidade forte enquanto o episódio de 1986 – 1987 foi de intensidade moderada. Apesar das análises não indicarem que a intensidade do fenômeno constitui o fator determinante para a distribuição espacial das anomalias do vento, essa característica pode explicar, em parte, essa diferença. A interação entre sistemas de diferentes escalas deve ser um dos fatores preponderante.

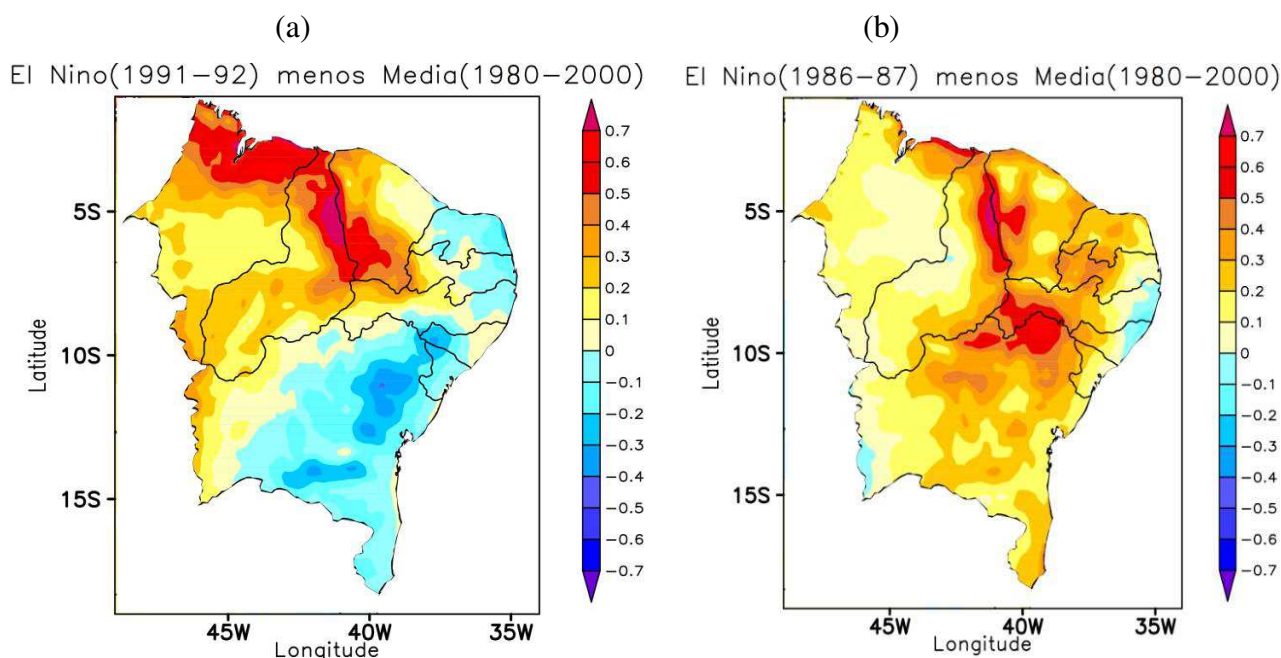


Figura 25 - a) e b) – Distribuição espacial da diferença entre a intensidade média do vento (m/s) em episódio de ELsemAATS e a média do período de1980 a 2000, para o trimestre DJF: **a)** El Niño de 1991 – 92; **b)** El Niño de 1986 – 87.

Independentemente da influência das AATS, em três dos quatro casos analisados (Figuras 26a, 27a e 27b) na região entre o Piauí e Ceará foi registrado valores relativamente altos de anomalias positivas da intensidade do vento, com valores da ordem de 0,8 m/s exceto para o El Niño de 1997 – 1998. Esse alto valor observado de velocidade do vento na divisa do estado do Piauí e Ceará em três dos quatro episódios de El Niño analisados, pode ser resultante de interações entre o escoamento de grande escala (ventos alísios) e circulações locais.

Um aspecto relevante e que deve ser considerado é o efeito da topografia na região (Serra da Ibiapaba). Com altitude de aproximadamente 800 metros em relação ao nível médio do mar, e orientada na direção norte-sul (BARRETO, 2001), o aquecimento diferenciado resultante do relevo e cobertura do solo gera circulações de encosta (ventos anabáticos e catabáticos) e brisas do tipo vale-montanha.

6.2.3 Média da La Niña com Anomalias de TSM no Atlântico Sul (LAcomAATS)

A distribuição espacial de anomalias da intensidade do vento para o episódio de La Niña 1996-1997 é apresentada na Figura 28. Pode-se observar a ocorrência de anomalias positivas da intensidade do vento no interior do estado da Paraíba, Rio Grande do Norte e no setor norte do Ceará. Essas anomalias chegam a atingir valores superiores a 0,5 m/s. Anomalias negativas foram observadas principalmente nos estados da Bahia, no oeste de Alagoas e em todo estado de Sergipe.

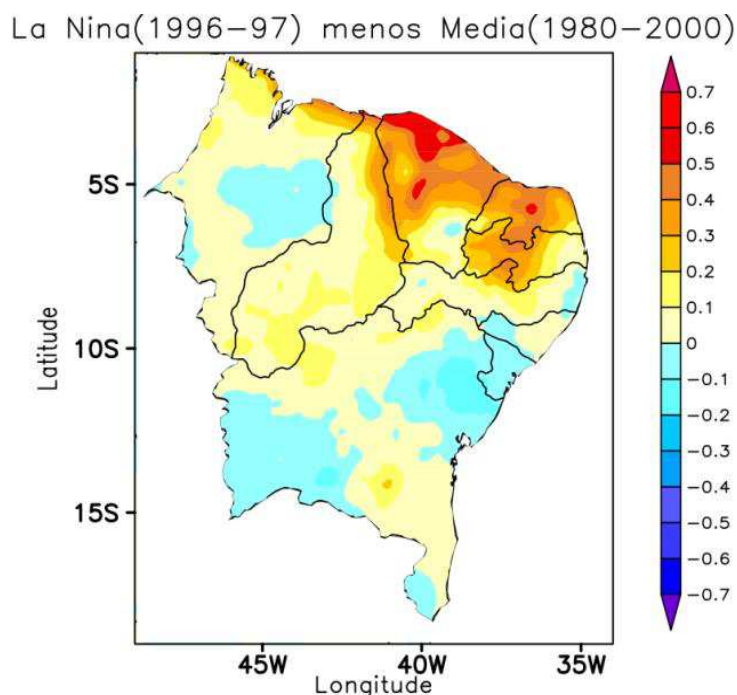


Figura 26 - Distribuição espacial da diferença entre a intensidade média do vento (m/s) em episódio de LAcomAATS e a média do período de 1980 a 2000, para o trimestre DJF: La Niña de 1996 – 97.

6.2.4 Média da La Niña sem Anomalias da TSM no Atlântico Sul (LAsemAATS)

A distribuição espacial de anomalias da intensidade do vento para o episódio de La Niña 1988-1989 é apresentada na Figura 29a. Observa-se que quase todo o NEB apresenta

valores negativos de anomalias da intensidade do vento, exceto no extremo norte da Bahia. Os valores de anomalias negativas chegam a $-0,5$ m/s. Sendo detectados principalmente na divisa do Piauí com os estados do Ceará, Paraíba, Bahia, Pernambuco, Sergipe e Alagoas.

Na Figura 29b é apresentada a distribuição espacial de anomalias da intensidade do vento para o episódio de La Niña 1998- 1999. Os valores de anomalias negativas estão presentes na maior parte do NEB, exceto no setor leste dessa região onde se observam valores de anomalias positivas. Valores de $-0,5$ m/s são observados principalmente nos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. Esses resultados são semelhantes aqueles observados nos estudos de [Andreoly e Kayano \(2006\)](#); [Oliveira \(2011\)](#) e [Cavalcanti *et al.*, \(2020\)](#). Os autores evidenciam que, para episódios de La Niña, na maior parte do NEB são observados em média, valores de intensidade do vento abaixo da média da região.

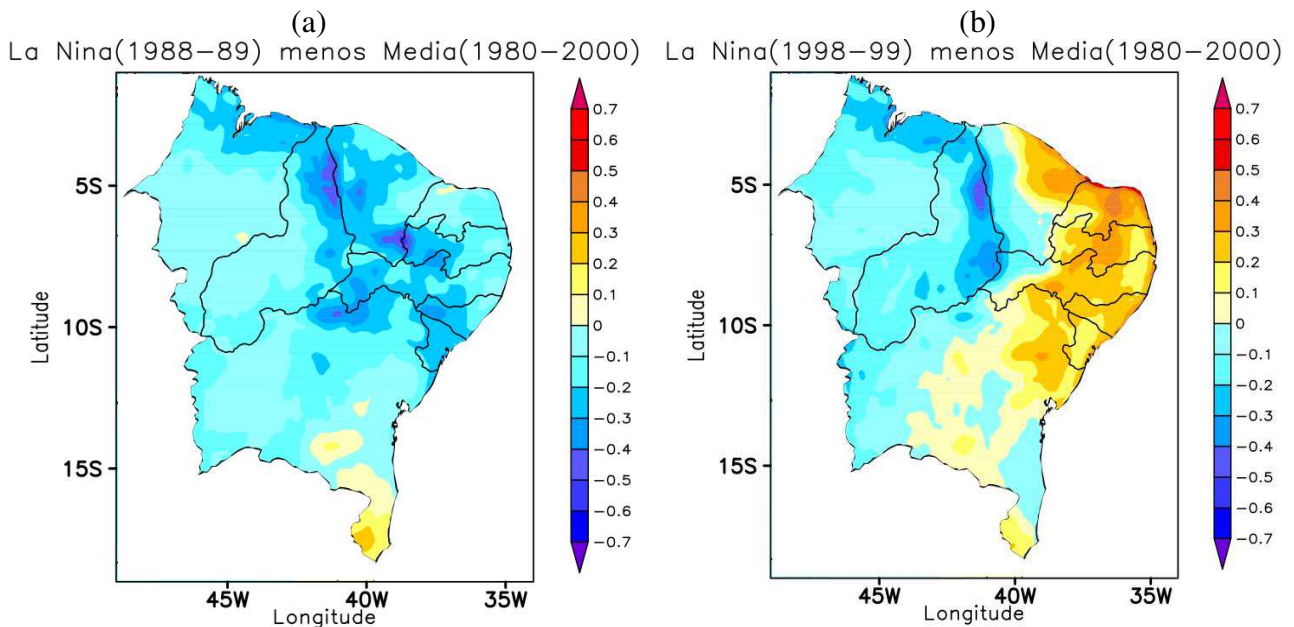


Figura 27 -1 Distribuição espacial da diferença entre a intensidade média do vento (m/s) em episódio de LAsemAATS e a média do período de 1980 a 2000, para o trimestre DJF: **a)** La Niña de 1988 – 89; **b)** La Niña de 1998 – 99.

As análises indicam que em média, nos casos analisados, o episódio de LAcomAATS, com o ATS frio, apresenta condições relativamente favorável a exploração do potencial eólico. Situação oposta foi observada nos episódios de La Niña em que não foram observadas anomalias de TSM no ATS.

Em síntese, as análises realizadas separadamente para os eventos selecionados permitiram observar que em episódios de La Niña que geralmente são caracterizados por valores mais baixos da intensidade do vento na maior parte do NEB ([CAVALCANTI *et al.*, 2020](#)), podem apresentar condições favoráveis pra geração de energia eólica como observado

na Figura 29b no leste do NEB, assim como no norte do Ceará, oeste do Rio Grande do Norte, interior da Paraíba e grande parte de Pernambuco (Figura 28 e 29b).

6.3 CARACTERÍSTICAS DO VENTO EM PETROLINA (PE)

É importante destacar que os resultados foram obtidos considerando os eventos de mesmo tipo em conjunto, apenas para o LAcomaATS os resultados se baseiam num único evento.

Os resultados apresentados até o momento tiveram como enfoque principal análises da distribuição espacial das anomalias de intensidade do vento em cada um dos episódios selecionados descritos no Quadro 1. No entanto, é importante considerar que, em termos de caracterização do potencial e aproveitamento da energia eólica, algumas localidades se destacam em função de características peculiares da região. Em estudos de prospecção eólica é necessária uma análise mais detalhada no local onde será feito a instalação do aerogerador, como por exemplo: avaliação da direção predominante do vento, do ciclo diário da velocidade do vento, de frequências de velocidades, ou seja, durante quanto tempo o vento permanece numa determinada velocidade e de possíveis alterações causadas por variabilidades climáticas.

Vários estudos comprovam que em determinadas situações variações espaciais na temperatura do solo e da atmosfera são características dominantes em escala local e podem influenciar de forma substancial o perfil vertical da velocidade do vento. Relevo e cobertura da terra são fatores que afetam o comportamento do vento em regiões de terrenos complexos. Neste contexto, análises do vento na região de Petrolina (PE), foram incluídas em função da importância regional no contexto social e econômico da região Nordeste além da produção de energia renovável (eólica, solar e hídrica) com participação cada vez mais significativa no mercado elétrico brasileiro. Próximo de Petrolina-PE há um complexo de parques eólicos (Ventos do Piauí).

A posição geográfica de Petrolina é apresentada na Figura 20 (retângulo na cor vermelha). Os dados utilizados para análises foram do ponto de grade localizado exatamente sobre a estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) que é indicado na Figura 20.

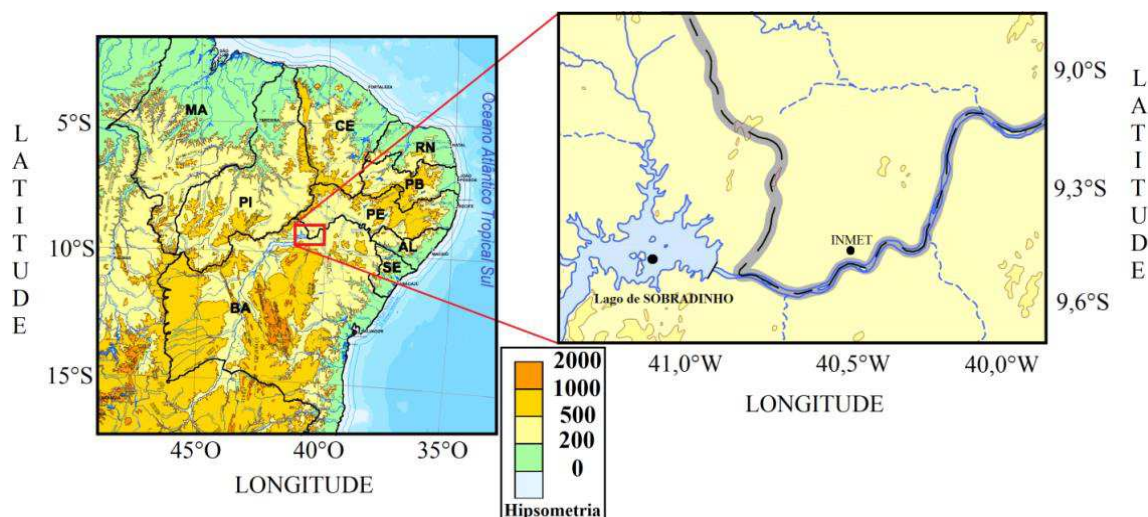


Figura 20 - Mapa da divisão política do Nordeste do Brasil com destaque para a representação do relevo na região de Petrolina – PE. A posição geográfica da estação meteorológica do INMET é indicada no destaque.

6.3.1 Direção predominante do Vento

A direção predominante do vento em Petrolina (PE) foi determinada com base na Rosa dos Ventos. Os resultados obtidos para o trimestre dezembro, janeiro e fevereiro (DJF), no período de 1980 a 2000 é apresentada na Figura 30. As direções predominantes do vento identificadas para a estação de Petrolina mostra um padrão de ventos distribuídos nos quadrantes sudeste e nordeste. Entretanto, com destaque para ventos provenientes das direções leste-nordeste (ENE) e de leste-sudeste (ESE) (Figura 30a). Já em relação à velocidade do vento, é possível observar na Figura 30b que a intensidade mais frequente do vento se concentra nas classes com faixas de velocidade entre 3,0-3,5 m/s e 3,5-4,0 m/s representando respectivamente 54,2% e 25,0% dos valores de intensidade do vento ocorrendo nessas faixas.

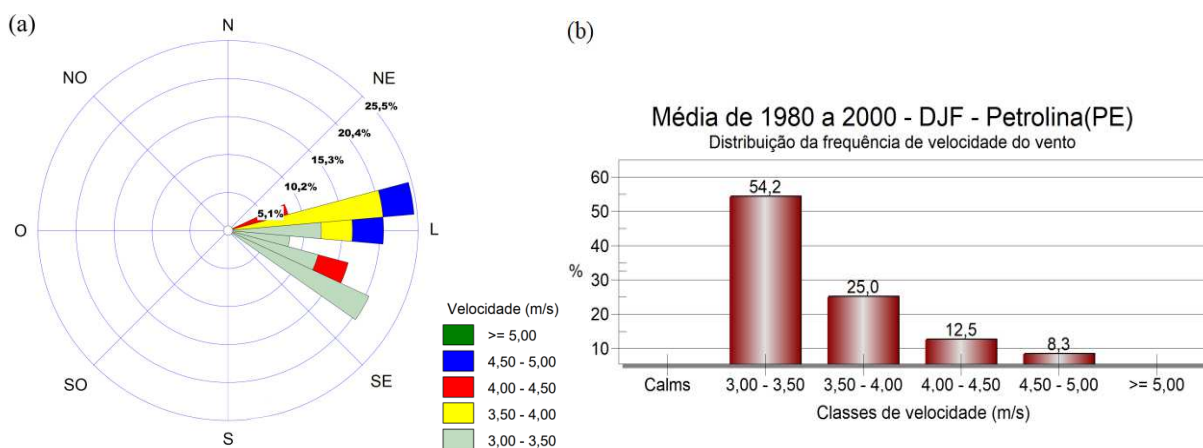


Figura 28 - Rosa dos ventos, velocidade, direção e classes com frequência de ocorrência da velocidade do vento a 10 m acima da superfície no ponto de grade da cidade de Petrolina, no trimestre DJF do período de 1980 a 2000.

Fonte de dados: ECMWF.

Na Figura 31 são apresentados os gráficos da rosa dos ventos (Figura 31a e 31c) e da distribuição de frequência da velocidade para episódios de ELcomAATS e ELsemAATS (Figura 31b e 31d). Na análise da direção predominante e intensidade do vento durante o período de atuação dos episódios de El Niño, para os episódios de ELcomAATS predominam ventos das direções leste-nordeste (ENE) e sudeste-leste (SEE) (Figura 31a), com a intensidade mais frequente do vento ocorrendo na faixa de 3,0-3,5 m/s e representando 66,7%, da ocorrência da velocidade do vento nessa faixa (Figura 31b). Já em relação aos episódios de ELsemAATS predominaram ventos de sudeste-leste (SEE) (Figura 31c), e intensidade mais frequente do vento ocorrendo na faixa de 3,5-4,0 m/s representando 58,3% da ocorrência da velocidade do vento nessa faixa (Figura 31d).

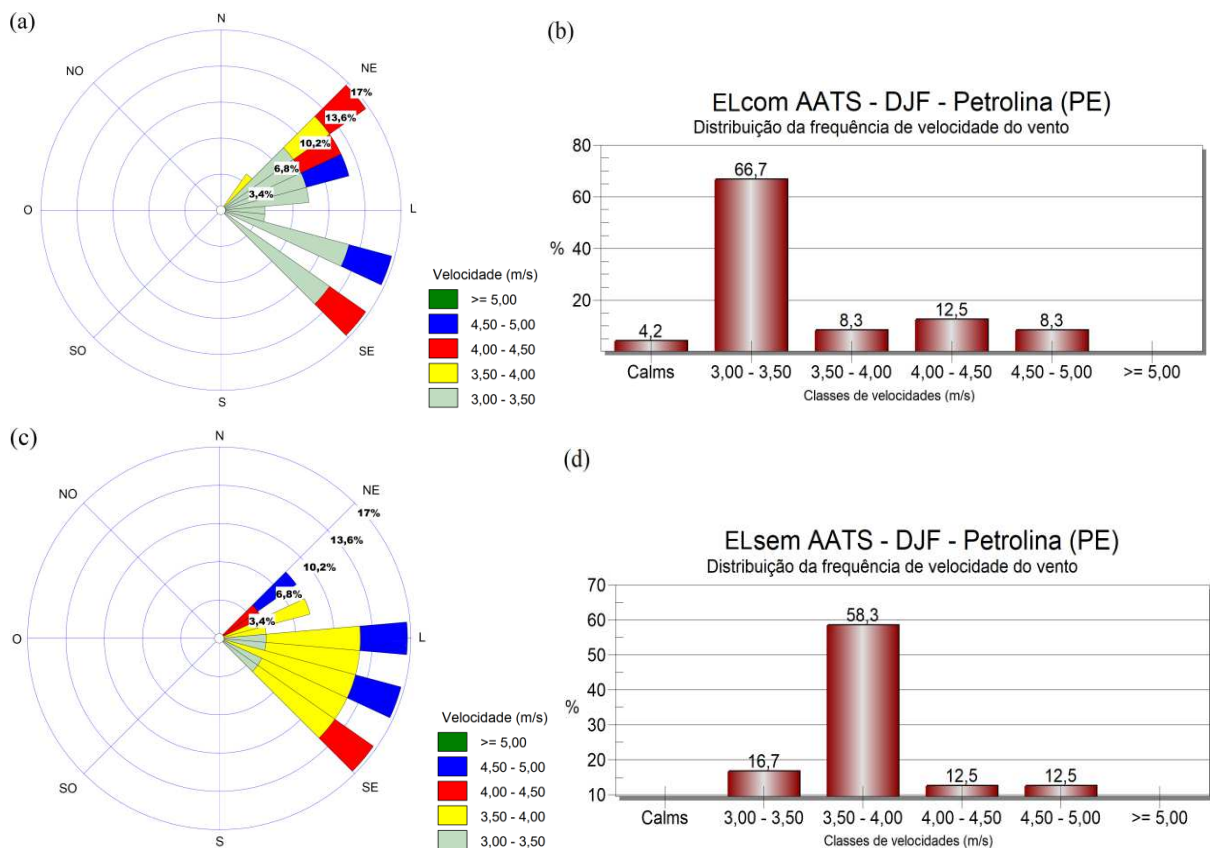


Figura 29 - Rosa dos ventos, velocidade, direção e classes com frequência de ocorrência da velocidade do vento a 10 m acima da superfície observada em ELcomAATS (a) e (b); ELsemAATS (c) e (d). **Fonte de dados:** ECMWF.

Nos resultados da análise da direção predominante do vento em episódios de El Niño ocorrendo simultaneamente quando são observadas anomalias positivas de TSM no Atlântico Tropical Sul (ELcomAATS) (Figura 31a), nota-se que, em relação a média da região de Petrolina-PE no trimestre DJF (Figura 30a) há uma alteração na direção do vento

predominante. A direção predominante do vento na região de Petrolina-PE que se concentra no quadrante sudeste (SE) (Figura 30a) passa a se concentrar no quadrante nordeste (NE) (Figura 31a), outro detalhe pode ser observado na velocidade do vento (Figura 31b) que tem o seu valor reduzido e apresenta a intensidade do vento mais frequente na faixa de 3,0-3,5 m/s com 66,7% dos valores de intensidade do vento ocorrendo nessa faixa de velocidade contra 54,2% da média na região (Figura 30b). Já em relação aos episódios de El Niño ocorrendo quando não foram observadas anomalias de TSM no Atlântico Tropical Sul (ELsemAATS) (Figura 31c), os resultados da análise da direção predominante do vento indicam características semelhantes a da região de Petrolina-PE durante o ano com direção média predominante do vento se concentrando no quadrante sudeste (SE) (ventos de Sudeste), resultados semelhantes foram encontrados por (Melo *et. al.*, 2013; Junior *et. al.*, 2019). Um resultado bastante interessante para os episódios de ELsemAATS pode ser observado na análise da velocidade do vento (Figura 31d), os valores de intensidade do vento mais frequente se concentram na faixa de 3,5-4,0 m/s com 58,3% dos ocorrendo nessa faixa de velocidade contra 25,0% da média da região o que indica um aumento da intensidade do vento quando não há influência das anomalias positivas de TSM no Atlântico Tropical Sul.

Em síntese esses resultados indicam que, a presença de anomalias positivas de TSM no Atlântico Tropical Sul (águas mais aquecidas no Atlântico Sul) durante a atuação de episódios de EL Niño no trimestre dezembro, janeiro e fevereiro contribui para mudar o padrão da direção predominante do vento e reduz a intensidade do mesmo na região de Petrolina-PE (Figuras 31a e 31b), enquanto que a ausência de anomalias positivas de TSM no Atlântico Tropical Sul durante o período de atuação de episódios de EL Niño no trimestre analisado aumenta a intensidade do mesmo nessa região (Figura 31c e 31d).

Na Figura 31.1 são apresentados os gráficos da rosa dos ventos (Figura 31.1a e 31.1c) e da distribuição de frequência de velocidade para episódios de LacomAATS e LAssemAATS (Figuras 31.1b e 31.1d). Na análise da direção predominante e intensidade do vento durante o período de atuação dos episódios de La Niña, para os episódios de LacomAATS predominam ventos das direções leste-sudeste (ESE) e leste-nordeste (ENE) (Figuras 31.1a) com intensidade do vento mais frequente na faixa de 3,5-4,0 m/s representando 45,8% de valores ocorrendo nessa faixa de velocidade. Já em relação aos episódios de LAssemAATS predominaram ventos das direções leste-nordeste (ENE) e leste-sudeste (ESE) com maior concentração no quadrante nordeste (NE), onde os valores de intensidade do vento mais frequente se concentraram na faixa de 3,0-3,5 m/s e representaram 70,8% dos valores ocorrendo nessa faixa de velocidade (Figura 31.1d).

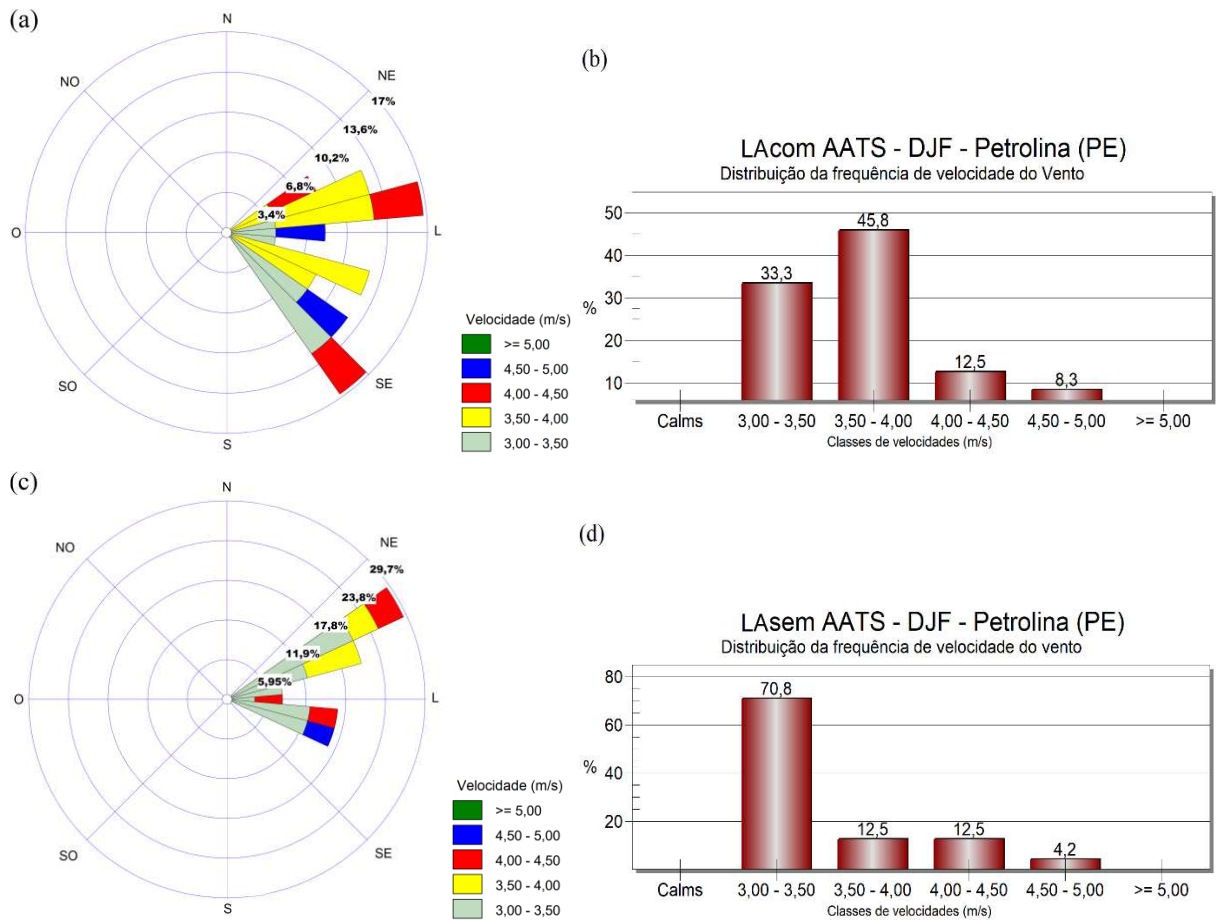


Figura 31.1 - Rosa dos ventos, velocidade, direção e classes com frequência de ocorrência da velocidade do vento a 10 m acima da superfície observada em LacomAATS (e) e (f); LAsemAATS (g) e (h).
Fonte de dados: ECMWF.

Nos resultados da análise da direção predominante do vento em episódios de La Niña ocorrendo simultaneamente quando são observadas anomalias negativas de TSM no Atlântico Tropical Sul (LacomAATS) (Figura 31.1a), nota-se que, em relação a média da direção predominante do vento no trimestre DJF na região de Petrolina-PE (Figura 30a), houve variações tanto na velocidade quanto na direção predominante do vento. O resultado de maior relevância pode ser observado nos valores de velocidade do vento em que apresentou predominância na classe de 3,5-4,0 m/s e representou 45,8% de ocorrência de velocidade do vento nessa faixa de velocidade (Figura 31.1b) contra apenas 25,0% para a média da região (Figura 30b), o que indica um aumento da intensidade do vento durante a atuação de episódios de La Niña quando o Atlântico Sul está mais frio. Já em relação aos episódios de La Niña ocorrendo quando não são observadas anomalias de TSM no Atlântico Tropical Sul (LAsemAATS) (Figura 31.1c) também nota-se variações na velocidade e direção do vento na região de Petrolina-PE, direção predominante de ventos da direção Nordeste (NE) (Figura

31.1c) em que os valores de intensidade do vento são reduzidos e apresenta maior ocorrência de intensidade do vento na faixa de 3,0-3,5 m/s o que representou 70,8% de valores de intensidade do vento ocorrendo nessa faixa de velocidade (Figura 31.1d) contra 54,2% para a média da região no trimestre analisado (Figura 30b).

Em resumo, esses resultados sugerem que, a presença de anomalias negativas de TSM no Atlântico Tropical Sul em episódios de La Niña contribuem para mudar a direção predominante do vento e aumentam a intensidade do vento na região de Petrolina-PE durante o Trimestre DJF. Enquanto que a ausência de anomalias negativas de TSM no Atlântico Tropical Sul durante a atuação de episódios de La Niña contribuem alterando a direção predominante do vento alterando-a para ventos de nordeste (NE) e reduz a velocidade do vento nesse período para essa região.

6.3.2 Ciclo diário da intensidade mensal do vento em Petrolina (PE) no trimestre DJF

O ciclo diário médio mensal da intensidade do vento à 10 metros em Petrolina-PE no período 1980-2000 e nos episódios de ELcomAATS e ELsemAATS para dezembro, janeiro e fevereiro é apresentado nas Figuras 32a, 32b e 32c.

Pelo formato da curva observada nos gráficos das Figuras 32 e 34 é possível notar a alta intensidade e constância dos ventos alísios que normalmente modulam os ventos na região.

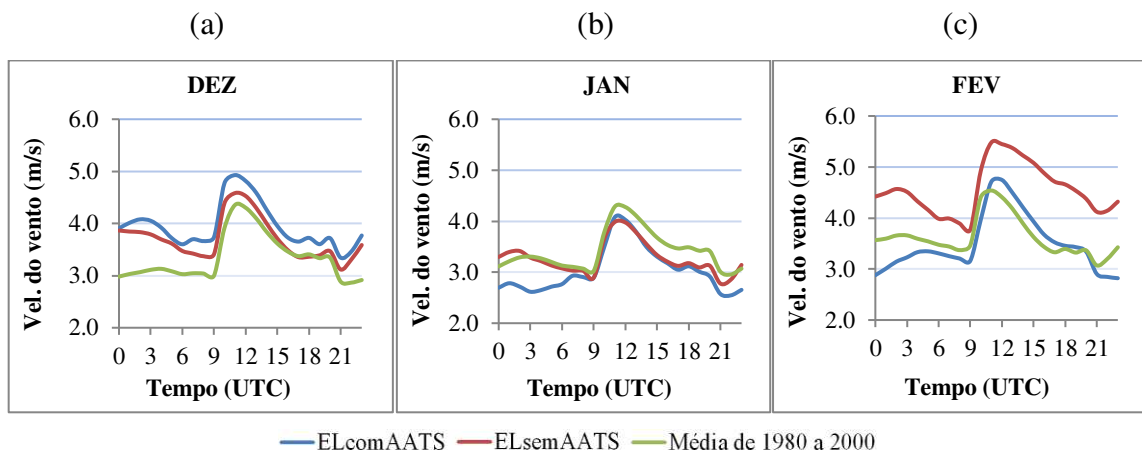


Figura 30 - Ciclo diário da intensidade do vento para os meses do trimestre DJF. (a) dezembro, (b) janeiro e (c) fevereiro na cidade de Petrolina-PE, análises durante episódios de ELcomAATS curva azul, ELsemAATS curva vermelha e média de 1980 a 2000 curva verde.

Verifica-se que no mês de dezembro (Figura 32a) os valores mais altos da intensidade do vento, ao longo do dia, ocorreram em condições de ELcomAATS (curva azul).

Independentemente do mês analisado, observa-se um ciclo diário bem definido em Petrolina com valores máximos em torno de 12 UTC.

Observa-se que o horário de maior velocidade nas três situações analisadas é por volta das (12 UTC) e que há ainda dois picos de mínimos: um ocorrendo às (9 UTC) e o outro às (21 UTC). Resultados semelhantes foram observados por (MELO *et. al.*, 2014).

No mês de janeiro (Figura 32b), durante quase todo o dia a intensidade do vento para a média de 1980 a 2000 foi superior aos valores durante a atuação dos episódios de ELcomAATS e ELsemAATS, principalmente entre 12 UTC até aproximadamente 21 UTC. Observa-se também que, durante os episódios de ELsemAATS, os valores de intensidade do vento foram superiores em praticamente quase todo o dia em relação aos episódios de ELcomAATS, ou seja, com o ATS mais aquecido, alguns valores chegaram a ter quase 1 m/s de diferença como pode ser visto às (3 UTC).

No mês de fevereiro (Figura 32c) os valores da intensidade do vento nos episódios de ELsemAATS assim como em janeiro, se mostraram superiores aos episódios de ELcomAATS durante todo o dia. É importante destacar nesse mês de fevereiro que, durante a atuação dos episódios em que não foram observadas anomalias da TSM no ATS (ELsemAATS), os valores da intensidade do vento atingiram mais de 1m/s acima da média de 1980 a 2000 durante um período de aproximadamente 12 horas como pode ser visto entre 12h e 21h.

Em síntese, observou-se que os casos caracterizados por episódios de ELsemAATS, ou seja, quando não foram observadas anomalias positivas de TSM no Atlântico Tropical Sul podem ser favoráveis à exploração de energia eólica por apresentar valores de intensidade do vento superiores aos da média climatológica da região, essa afirmativa poderá ser observada mais detalhadamente. Percebe-se também que, ao longo dos meses, o valor da intensidade do vento para episódios de ELsemAATS aumentou consideravelmente em relação aos valores observados em episódios de ELcomAATS. Este resultado pode indicar que, as anomalias positivas de TSM no oceano Atlântico Tropical Sul (águas do Atlântico Tropical Sul mais aquecidas) em concomitância com as anomalias positivas de TSM no Pacífico tropical (águas no Pacífico Tropical mais aquecidas) contribuem para alterar a intensidade do vento em Petrolina-PE, reduzindo a intensidade do mesmo no trimestre DJF diferentemente de quando há apenas anomalias positivas de TSM no Pacífico Tropical.

6.3.2.1 Análise *Box-Plot* para Petrolina (PE) – Episódios de ELcomAATS e ELsemAATS

Gráficos de *Box-Plot* foram elaborados com propósito de fazer uma análise e comparação dos resultados obtidos em cada um dos meses do trimestre DJF para os episódios de ELcomAATS, ELsemAATS, LcomAATS, LAsemAATS e média de 1980 a 2000. Os dados utilizados são do ponto de grade que coincide com uma das estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), (Figura 20).

Nas Figuras 33a, 33b e 33c, são apresentados os *Box-Plot* em cada um dos meses do trimestre DJF para a média do período de 1980 a 2000, para os episódios de ELcomAATS e também para os episódios de ELsemAATS respectivamente. O “x” azul indica a média da intensidade do vento no mês analisado e o “x” e “o” vermelho indicam outliers.

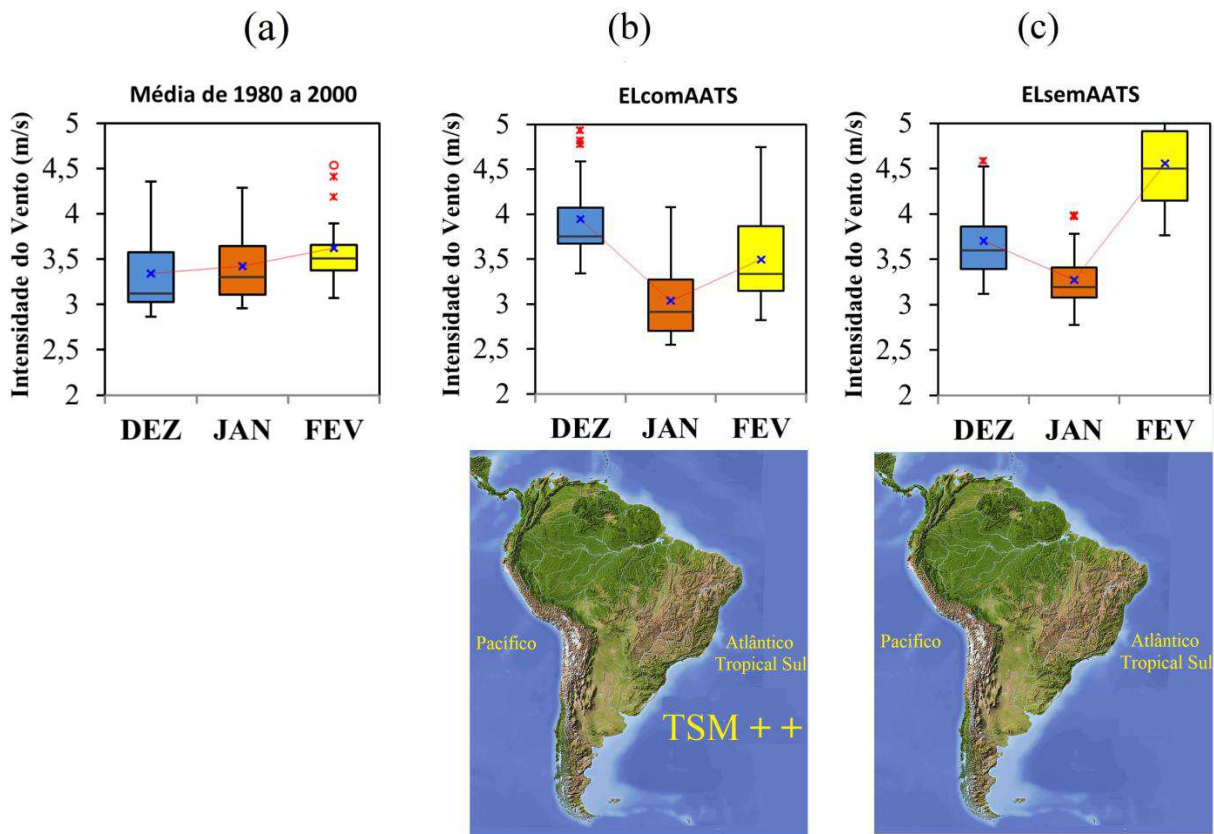


Figura 31 - Intensidade do Vento (m/s) para os meses do trimestre DJF.: (a) Média do período 1980 a 2000; (b) ELcomAATS e (c) ELsemAATS..

Em ambas as Figuras 33b e 33c, observa-se que as medianas da intensidade do vento são menores que as suas médias, ambos são positivamente assimétricos. Isso implica em maior concentração de valores abaixo da média e não é um resultado favorável se a meta for aproveitamento da energia eólica. Buscam-se valores altos da intensidade do vento.

Ao comparar os gráficos de boxplot, verifica-se que, independentemente da existência de TSM ++, o vento é mais intenso para episódios de El Niño no mês de dezembro, enquanto

que no mês de janeiro o vento é menos intenso que a média em ambos os casos, provavelmente devido a atuação de VCAN (Vórtice ciclônico de altos níveis), o que é comum nessa época do ano na região do NEB (KOUSKY e GAN, 1982). Já em relação à comparação entre os episódios ELcomAATS e ELsemAATS, observa-se que os valores de intensidade do vento para o mês de dezembro foram maiores quando o Atlântico tropical Sul estava mais aquecido enquanto que nos meses de janeiro e fevereiro os valores intensidade do vento foram maiores para os episódios de ELsemAATS. Um dado relevante dessa análise foi obtido para o mês de fevereiro (Figura 33c) onde o valor da intensidade do vento para os episódios de ELsemAATS foi consideravelmente superior aos episódios de ELcomAATS (Figura 33b) com valores que ultrapassam 1,0 m/s nesse mês. Claramente, observa-se que nos episódios analisados, no (ELcomAATS) houve uma redução substancial na intensidade do vento concordando com os resultados da análise geral na Figura 32.

É importante destacar que, o mês de dezembro para os episódios de ELsemAATS apresentou valores inferiores aqueles observados no mês de dezembro com para o ELcomAATS, indicando que, apesar do trimestre DJF, para os casos de ELsemAATS, apresentar em média, valores de intensidade do vento superiores aos observados durante os episódios de ELcomAATS, deve-se levar em consideração o comportamento do vento em cada mês desse trimestre, pois a atuação de diferentes sistemas sinóticos, o que é comum nessa época do ano, por se tratar do período úmido, pode alterar a intensidade do vento em cada mês.

7.3.2.2 Petrolina-PE: Episódios de LAcomAATS e LAsemAATS

O ciclo diário da intensidade do vento à 10 metros em Petrolina-PE durante a atuação dos episódios de LAcomAATS e LAsemAATS para os meses do trimestre DJF é ilustrada nas Figuras 34a, 34b e 34c.

O ciclo diário da intensidade do vento para o mês de dezembro é ilustrado na Figura 34a.

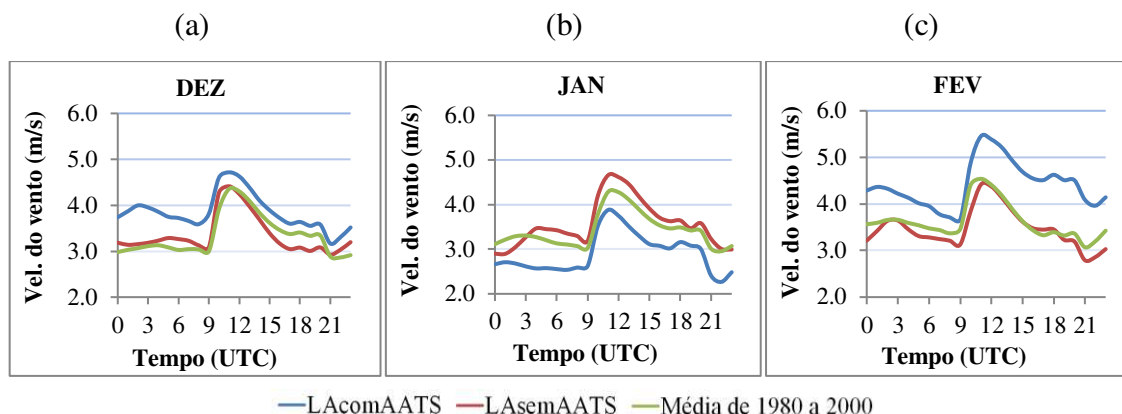


Figura 32 - Ciclo diário da intensidade do vento para os meses do trimestre DJF. (a) dezembro, (b) janeiro e (c) fevereiro na cidade de Petrolina-PE, análises durante episódios de LAcomaATS curva azul, LAsemaATS curva vermelha e média de 1980 a 2000 curva verde.

É possível observar que para o mês de dezembro (Figura 34a) o vento foi mais intenso durante nos episódios de LAcomaATS, ou seja, quando simultaneamente o ATS apresentava anomalias negativas de TSM. Diferentemente do mês anterior, o mês de janeiro (Figura 34b), apresentou para os episódios de LAcomaATS valores de intensidade do vento inferiores aos demais valores observados durante os episódios de LAsemaATS e também aos valores da média de 1980 a 2000. Em termos quantitativos de um mês para o outro (de dezembro para janeiro) a diferença entre os episódios foi de aproximadamente 0,5 m/s. No mês fevereiro (Figura 34c), os episódios de LAcomaATS voltam a apresentar valores maiores de intensidade do vento e assim como em dezembro esses valores são superiores aqueles observados em episódios de LAsemaATS e também a média climatológica. Essa análise sugere que em Petrolina-PE os episódios de La Niña ocorrendo quando simultaneamente são observadas anomalias negativas de TSM no ATS, possivelmente são influenciados pelos meses de novembro e março, assim sendo mais propícios para exploração da energia eólica nos meses de dezembro e fevereiro.

Os resultados indicam que para Petrolina-PE, os episódios de La Niña onde o ATS apresentava o mesmo sinal da anomalia de TSM, em geral, se mostraram favoráveis para exploração de energia eólica na região.

6.3.2.3 Análise estatística descritiva para Petrolina-PE – Episódios de LAcomaATS e LAsemaATS

Comparando os gráficos de Box-plot nos episódios de La Niña (Figuras 35a, 35b e 35c) observa-se que de modo geral os episódios de LAsemaATS apresentaram valores de intensidade do vento inferiores ao da média de 1980 a 2000 e também dos episódios de

LAcomaATS. Na análise dos episódios de La Niña Figuras 35b e 35c, é possível perceber que o mês de dezembro no caso de TSM LAcomaATS os valores de intensidade do vento foram maiores quando comparado ao mês de janeiro dos episódios de LAsemAATS, enquanto que no mês de janeiro para os episódios de LAcomaATS foram observados valores inferiores ao do mês de janeiro dos episódios de LAsemAATS. Já no mês de Fevereiro a intensidade do vento foi substancialmente superior para os casos de LAcomaATS. Os resultados sugerem que a presença de anomalias negativas de TSM no ATS durante a atuação de episódios de La Niña aumenta consideravelmente a intensidade do vento nos meses de dezembro e fevereiro na região de Petrolina-PE, comportamento inverso é observado no mês de fevereiro, as anomalias negativas de TSM no ATS parecem reduzir a intensidade do vento nesse mês.

Em síntese para os episódios de El Niño e La Niña, observa-se uma variação significativa do efeito das AATS no comportamento da intensidade do vento nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro. Possivelmente, a influência de diferentes sistemas sinóticos, no período analisados contribuíram para variação mensal observada e deve ser analisada de forma mais aprofundada.

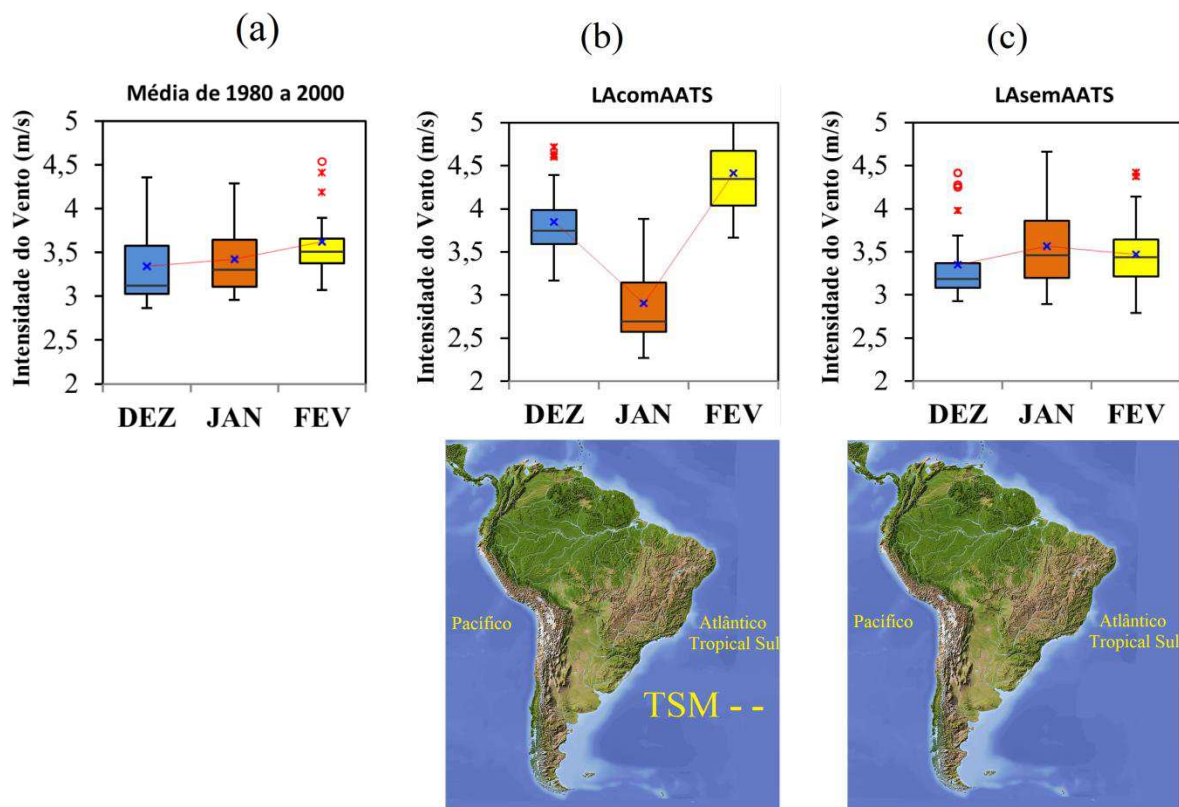


Figura 33 - Intensidade do Vento (m/s) para os meses do trimestre DJF.: (a) Média do período 1980 a 2000; (b) LAcomaATS e (c) LAsemAATS.

6.3.3 Ciclo diário da intensidade do vento em Petrolina (PE) para o trimestre DJF nas alturas de 10 m, 25 m, 100 m e 150 m.

As Figuras a seguir representam médias da velocidade do vento para as alturas de 10 m, 25 m, 100 m e 150 m, linhas azul, vermelha e verde respectivamente. Esses valores foram calculados para os eventos de ELcomAATS, ELsemAATS, LcomAATS e LAsemAATS na cidade de Petrolina-PE durante o período de 1980 a 2000 para o trimestre de DJF. A estimativa da velocidade do vento para essas alturas foi feita usando o perfil logaritmo do vento e a constante de rugosidade da superfície de 0,03 m.

Diferentemente das análises anteriores, as Figuras a seguir foram elaboradas para o trimestre DJF e não para os meses isoladamente.

6.3.3.1 El Niños

Entre os episódios de ELcomAATS e ELsemAATS, o ELsemAATS, (Figura 36c), apresentou os maiores valores de velocidade do vento e às 12 (UTC) os valores chegaram a quase 7,0 m/s para altitude de 150 m o que é uma velocidade ideal para exploração de energia eólica.

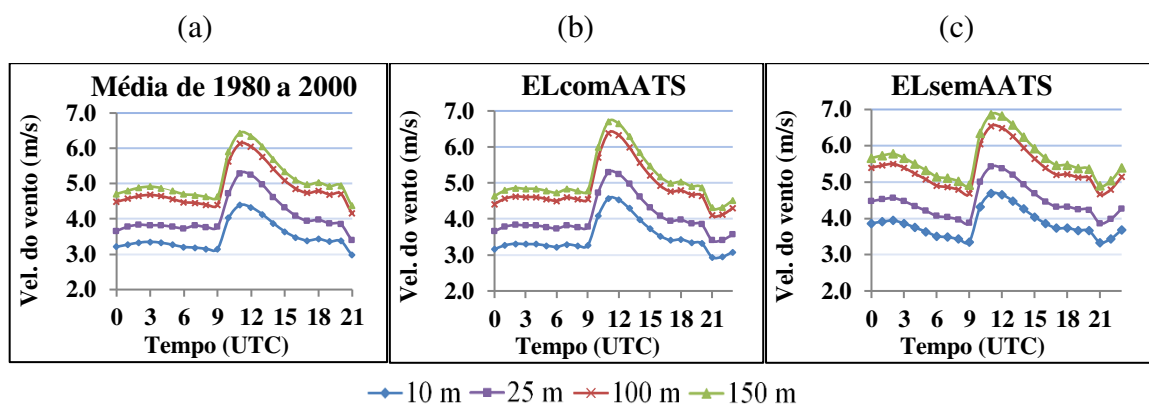


Figura 34 - Ciclo médio diário da intensidade do vento em Petrolina no trimestre DJF, (a) Media de 1980 a 2000, (b)ELcomAATS, (c) ELsemAATS.

6.3.3.2 Análise estatística descritiva para Petrolina (PE) – Episódios de ELcomAATS e ELsemAATS

Nos eventos de ELcomAATS, (Figura 37b) a média dos valores de velocidade do vento em 10 m ficou em torno de 3,5 m/s e em torno de 5,0 m/s para as alturas de 100 e 150

m, enquanto que, nos eventos de ELsemAATS, (Figura 37c), a média dos valores de velocidade do vento a 10 m ficou próximo aos 4,0 m/s e em torno de 5,5 m/s para as demais altitudes. Observa-se, que nos resultados encontrado para os episódios de ELsemAATS (Figura 37b), não houve nenhum outliers, o que é muito interessante e mostra a alta regularidade do vento nesse período. Além da alta regularidade, observa-se também, os maiores valores de intensidade do vento nesse trimestre para todas as alturas quando comparados com os valores de intensidade do vento observados para a média de 1980 a 2000 e para os episódios de EL comAATS. Esses resultados indicam que a presença de anomalias positivas de TSM no ATS (Figura 37b) pode contribuir para redução do vento nessa região, porém deve-se verificar detalhadamente cada mês, pois os resultados da intensidade do vento em cada mês podem ser diferentes dos resultados observados no trimestre. Esse caso pode ser verificado na Figura 36c durante o mês de Dezembro em episódios de ELsemAATS que apresentou valores de intensidade do vento inferiores aos observados no mês de dezembro durante os episódios de ELcomAATS.

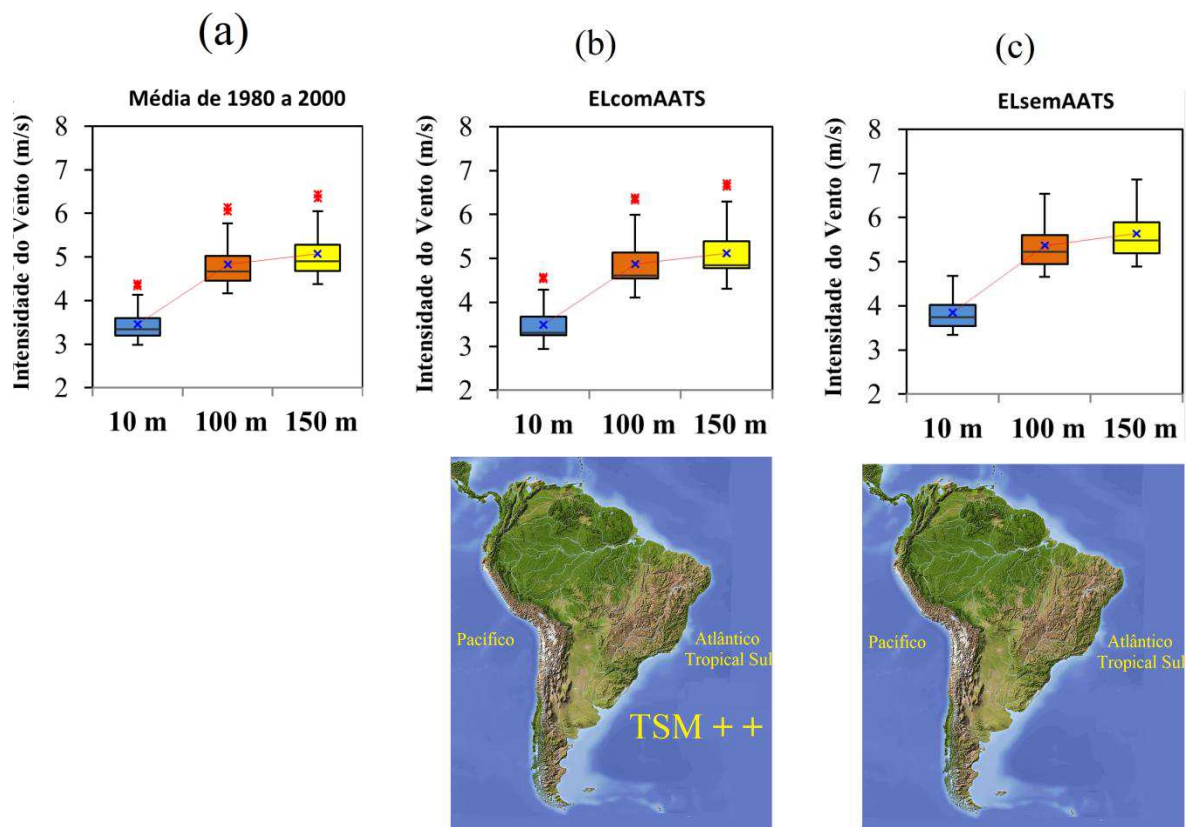


Figura 35 - Intensidade do Vento (m/s) para o trimestre DJF.: (a) Média do período 1980 a 2000; (b) ELcomAATS e (b) ELsemAATS. A caixa azul, laranja e amarela indica a intensidade do vento a 10 m, 100 m e 150 m respectivamente.

6.3.3.3 La Niñas

Entre os episódios de LAcomAATS e LAsemAATS, o LAcomAATS, (Figura 38b) apresentou os maiores valores de intensidade do vento, um pouco semelhante aos valores de intensidade do vento observados nos episódios de ELsemAATS, chegando a atingir em média valores próximos a 7,0 m/s às 12 UTC para altitude de 150 m.

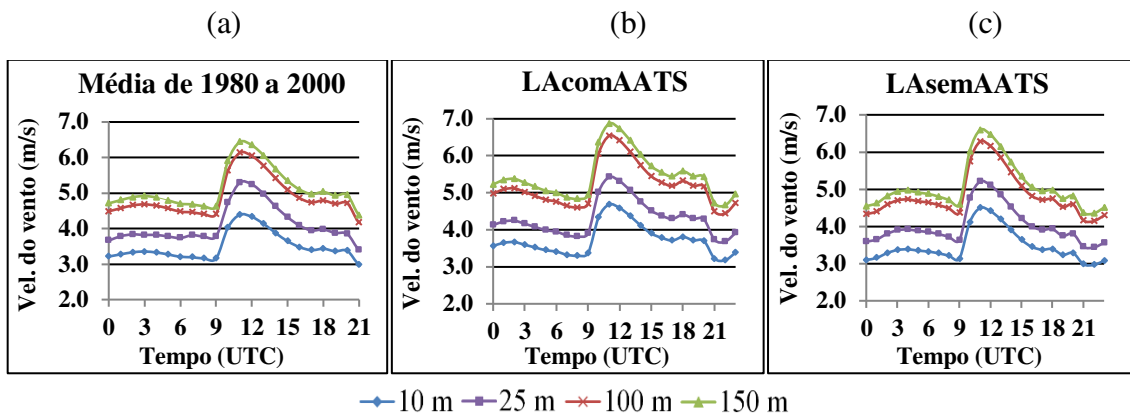


Figura 36 - Ciclo médio diário da intensidade do vento em Petrolina no trimestre DJF, (a) Média de 1980 a (b) LAcomAATS, (c) LAsemAATS.

6.3.3.4 Análise estatística descritiva para Petrolina-PE – Episódios de LAcomAATS e LAsemAATS

Os gráficos de *Box-plot* para os episódios de LAcomAATS e LAsemAATS indicam maiores valores de intensidade do vento para os episódios de LAcomAATS (Figura 39b), assim também como uma maior proximidade entre a média e a mediana quando comparado com o LAsemAATS, (Figura 39c). Esses resultados indicam que quando o ATS apresenta anomalias negativas de TSM (Figura 39b), se observa maiores valores de intensidade do vento na região de Petrolina-PE em todas as alturas analisadas. Esses resultados indicam que as anomalias negativas de TSM no ATS durante o período de atuação dos episódios de La Niña contribuem para o aumento da intensidade do vento na região de Petrolina-PE o que é um resultado relevante para exploração de energia eólica, mesmo assim, deve-se observar cada mês do trimestre analisado.

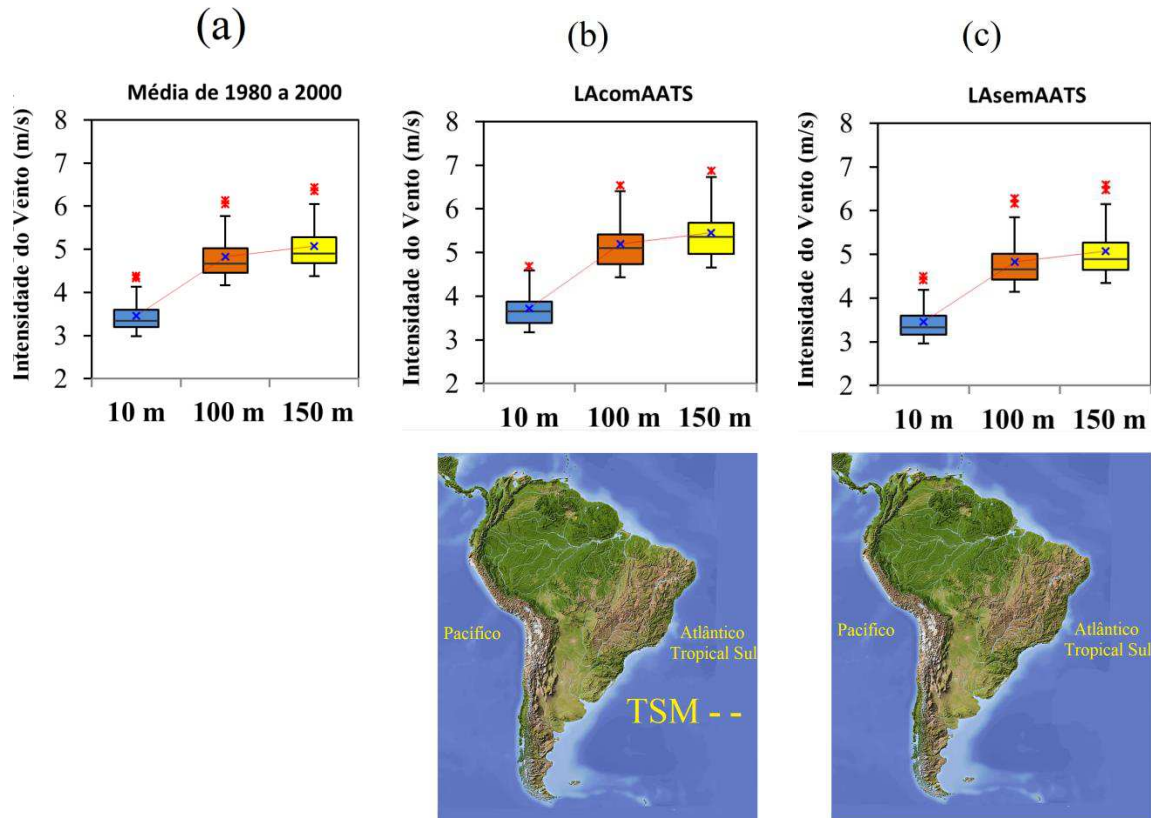


Figura 37 - Intensidade do Vento (m/s) para o trimestre DJF.: (a) Média do período 1980 a 2000; (b) LAcomAATS e (b) LAsemAATS. A caixa azul, laranja e amarela indica a intensidade do vento a 10 m, 100 m e 150 m respectivamente.

A análise estatística descritiva indicou que, assim como nas análises de cada mês do trimestre DJF a mediana em todos os casos analisados ficou abaixo da média com alguns casos apresentando valores consideravelmente abaixo da média como é o caso dos ELcomAATS (Figura 37b) e LAsemAATS, (Figura 39c)

Em todas as Figuras é possível observar que a intensidade do vento na região de Petrolina-PE aumenta em média cerca de 1 m/s da altura de 10 m para a altura de 100 m e aproximadamente 0,3 m/s de 100 m para 150 m.

Em síntese observa-se que os valores de velocidade do vento observados nos eventos de ELsemAATS, (Figura 36c e 37c) foram superiores aqueles encontrados no ELcomAATS (Figura 36b), diferentemente dos eventos de La Niña onde os maiores valores de velocidade do vento são observados para aqueles onde o ATS exerceu influência (Figura 38b e 39b). Nos casos de El Niño os maiores valores de velocidade foram observados quando o ATS não exercia influência, ou seja, quando não havia anomalias de TSM nesse oceano, o que pode sugerir que, a presença de anomalias positivas de TSM no Pacífico Tropical juntamente com a presença de anomalias positivas de TSM no Atlântico Tropical Sul reduz a intensidade do vento na região de Petrolina-PE enquanto que durante a atuação da La Niña, a

presença de anomalias negativas de TSM no oceano Atlântico Tropical Sul favorece o fortalecimento do vento nessa região durante o trimestre analisado nas alturas de 10 m, 100 m e 150 m.

É interessante mencionar que regime o de vento na região Nordeste é condicionado pelo escoamento dos alísios (macroescala) principalmente no período seco, pois no período úmido, a atuação de sistemas grande e mesoescala (enfraquece ou fortalece) os alísios de sudeste (SE) e possibilitam a ocorrência de vento em outras direções. O padrão do vento também pode variar consideravelmente de local para local dependendo das características do relevo e cobertura da terra.

Conforme mencionado anteriormente a cidade de Petrolina-PE se localiza na unidade geoambiental da depressão sertaneja e encontra-se a uma distância de aproximadamente 40 km do lago de Sobradinho (maior lago artificial do país). Portanto, mudanças no vento em mesoescala na região de Petrolina, podem ocorrer resultantes da interação entre os alísios nas camadas mais baixas da atmosfera e circulações do tipo brisa induzidas por gradientes de temperatura (vale-montanha/ brisa lacustre).

Estudos realizados com o objetivo de avaliar o impacto do lago de Sobradinho no padrão de circulação local e no ciclo horário do vento a 10, 25 e 50 metros de altura (CORREIA, 2001; CORREIA, *et. al.*, 2006; MELO, *et. al.*, 2014), identificaram a existência de um pico de velocidade máxima do vento às 9h (HL) e de dois picos secundários de velocidade mínima do vento, às 6h (HL) e 18h (HL). Resultados semelhantes foram detectados com as análises realizadas nesse trabalho. A atuação conjunta da brisa lacustre formada na área do lago de Sobradinho e circulações induzidas por aquecimento diferencial resultantes da mudança na cobertura e uso do solo representa um fator determinante no comportamento do ciclo diurno do vento principalmente em situações com pouca influência de sistemas de grande escala.

Uma ilustração do efeito conjunto da topografia e brisa lacustre gerada pelo lago de Sobradinho, no padrão de vento local sem a influência da escala sinótica, é apresentada na Figura 40. Correia, et al., (2006), verificaram que na latitude de Petrolina a direção do escoamento da brisa lacustre é no sentido oposto ao dos alísios e, portanto, provoca redução na intensidade do escoamento médio. As autoras mostram ainda que o vento local resultante do acoplamento entre a brisa lacustre e os ventos de encosta é mais intenso em torno das 15 HL. Esse padrão de comportamento explica em parte da queda na intensidade do vento a partir das 12 UTC. Esse comportamento contribui para redução da intensidade dos ventos de SE. A intensidade da circulação local é proporcional ao gradiente térmico (aquecimento diferencial).

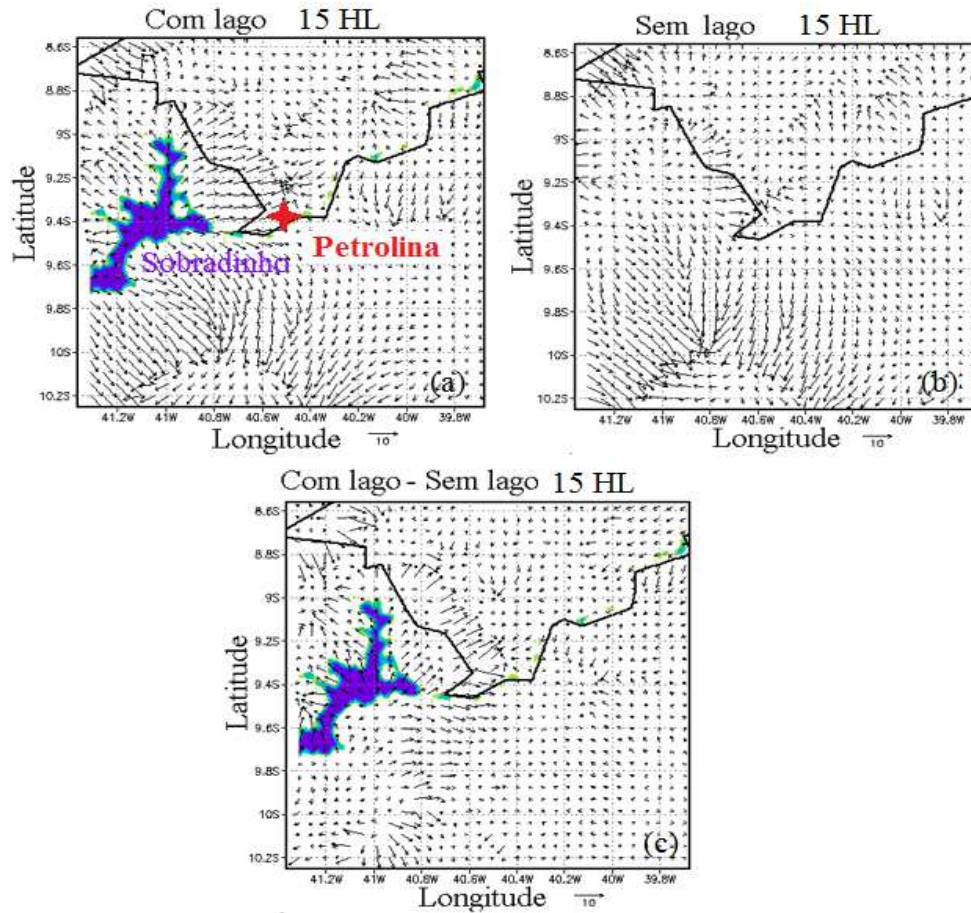


Figura 38 - Campo do vento (m/s) a 24 m da superfície no domínio numérico (resolução de 2km). Simulação com lago: (a) 15 HL; Simulação sem lago (b) 15 HL. Diferença entre as simulações com lago e sem lago: (c) 15 HL.

Fonte: Modificado de [Correia \(2001\)](#).

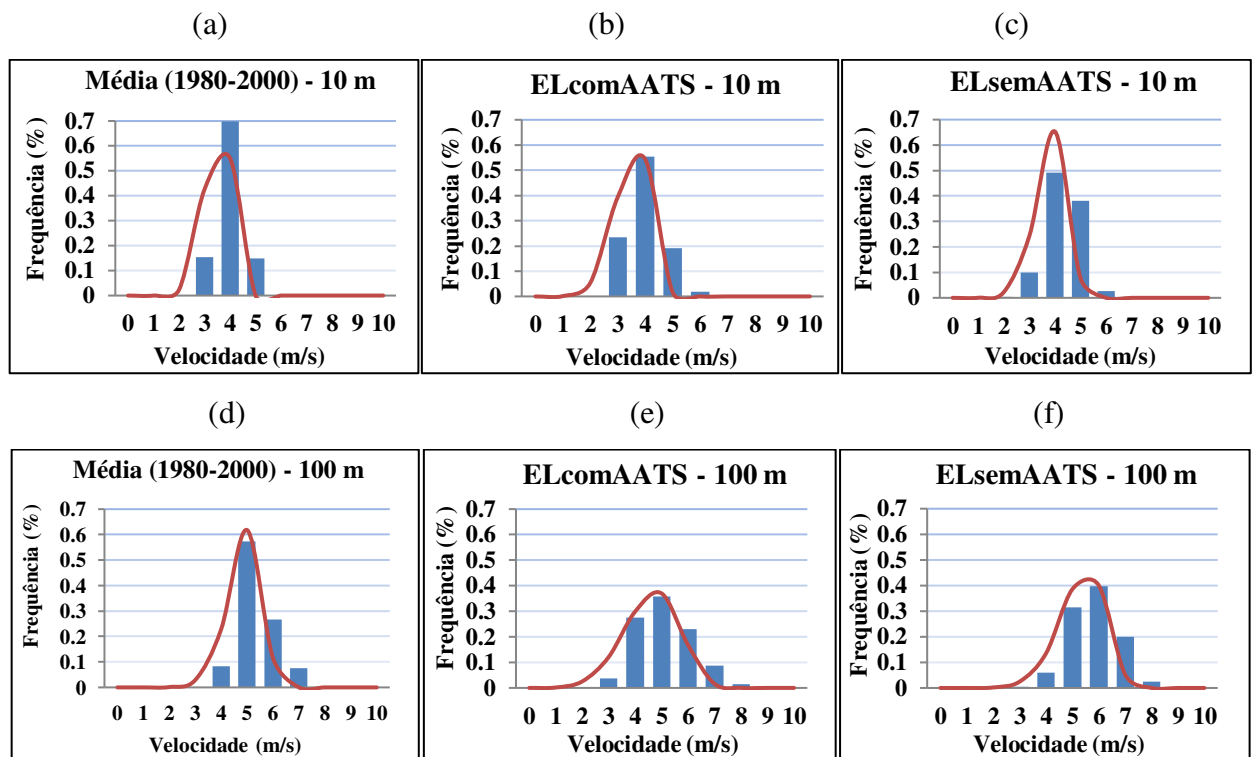
6.3.4 Distribuição de Weibull

A seguir são apresentadas Figuras com gráficos da distribuição por faixas de velocidades da frequência da velocidade do vento para as alturas de 10 m, 100 m e 150 m durante o período de 1980 a 2000 e nesse período para os eventos de ELcomAATS, ELsemAATS, LcomAATS e LsemAATS. Os valores são médias horárias observadas no trimestre DJF. A curva sobreposta às faixas de velocidades representa a distribuição de Weibull que é comumente utilizada para caracterizar a frequência de ocorrência da velocidade do vento de uma região, ou seja, durante quanto tempo o vento se mantém a uma determinada velocidade.

A distribuição de frequência da ocorrência de velocidade do vento na cidade de Petrolina-PE para o período de 1980 a 2000, mostra uma alta regularidade dos ventos nessa região, principalmente na altura de 100 m. A maior ocorrência de velocidade do vento se

concentra na faixa dos 4,5 m/s para altura de 10 m, na faixa de 5 m/s para altura de 100 m e nas faixas de 5 m/s e 6 m/s para a altura de 150 m.

Entre os episódios de El Niño, como era de se esperar, com base nos resultados obtidos até então, a ocorrência dos maiores valores de velocidade se concentraram nos episódios de ELsemAATS (Figuras 41c, 41f e 41i), onde a maior ocorrência dos valores está na faixa de 4 m/s para altura de 10 m e 6,0 m/s para as alturas de 100 m e 150 m, com alguns valores atingindo a faixa dos 8 m/s (Figuras 41f e 41i). Além de apresentar as maiores frequências de ocorrência com os maiores valores de velocidade do vento, o ELsemAATS também apresentou a maior regularidade do vento em todos os níveis de altitudes analisados quando comparados com os episódios de ELcomAATS, novamente indicando ser propício para exploração de energia eólica não só a 10 m de altura mais para as demais altitudes analisadas, ou seja, a ausência de anomalias positivas de TSM no Atlântico Tropical Sul durante o período de atuação dos episódios de El Niño, favorece a exploração eólica na região de Petrolina-PE no trimestre DJF para as alturas de 10 m, 100 m e 150 m porque além de apresentar uma alta regularidade do vento que pode ser observada na Figura 37c (box plot) e nas Figuras 41c, 41f e 41i apresenta também os maiores valores de intensidade do vento.



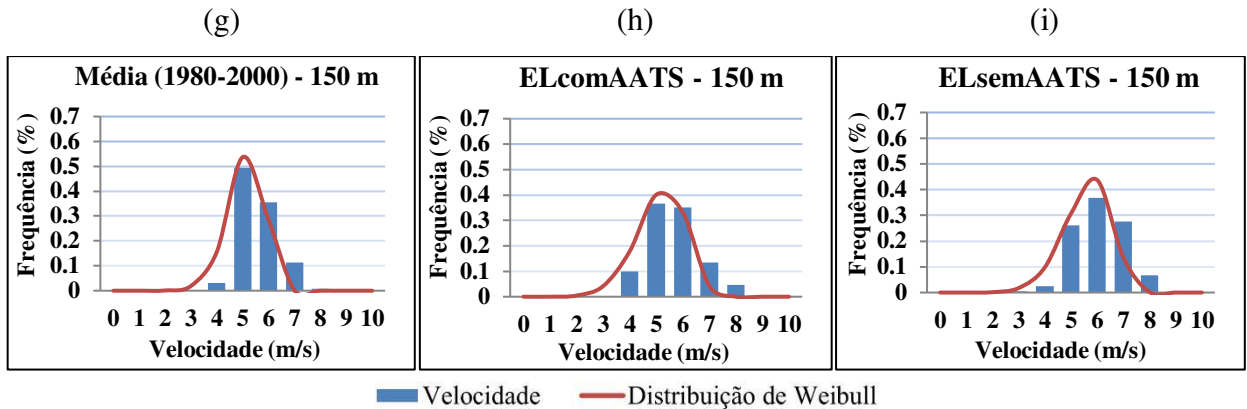
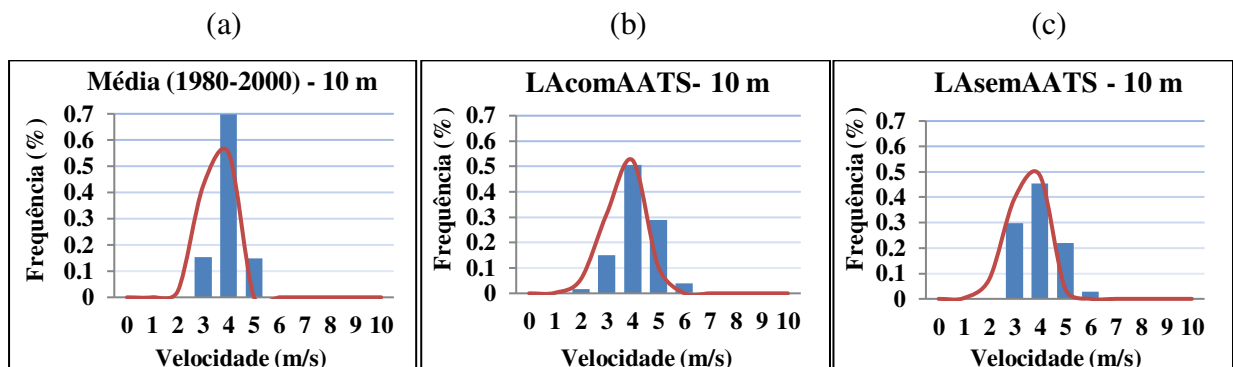


Figura 39 - Função Distribuição de frequência e ajuste da distribuição de Weibull para a velocidade do vento em 10 m, 100 m e 150 m acima da superfície, (a), (d) e (g) média de 1980 a 2000, (b), (e) e (h) ELcomAATS, (c), (f) e (i) ELsemAATS respectivamente.

Já nos episódios de La Niña, também era de se esperar, que a frequência de ocorrência dos maiores valores de velocidade do vento fossem observados para os eventos de LAcomAATS (Figuras 42b, 42e e 42h), onde a faixa de maior frequência de velocidade do vento para esses eventos (6 m/s e 7m/s) se assemelha aquelas encontradas nos eventos de ELsemAATS para altura de 150 m (Figura 41i). A maior regularidade do vento para o LAcomAATS foi observada para altura de 10 m, (Figura 42b), quando comparada com os eventos de LAsemAATS que apresentaram maior regularidade do vento para as alturas de 100 m e 150 m (Figura 42f e 42i). Os resultados da análise da distribuição de Weibull nos casos de La Niña sugerem que, apesar dos episódios de LAcomAATS apresentarem os maiores valores de intensidade do vento, observa-se maior irregularidade do vento para esses episódios quando comparados com a média da região (Figuras 42a, 42d e 42g), e com os episódios de ELsemAATS (Figuras 42c, 42f e 42i), na região de Petrolina-PE durante o trimestre DJF em quase todos os níveis de altitudes analisados, exceto para a altura de 10 m. As anomalias negativas de TSM no ATS durante o período de atuação dos episódios de La Niña contribuiu para o aumento de intensidade do vento na região de Petrolina-PE mas, reduziu a regularidade do vento nessa região.



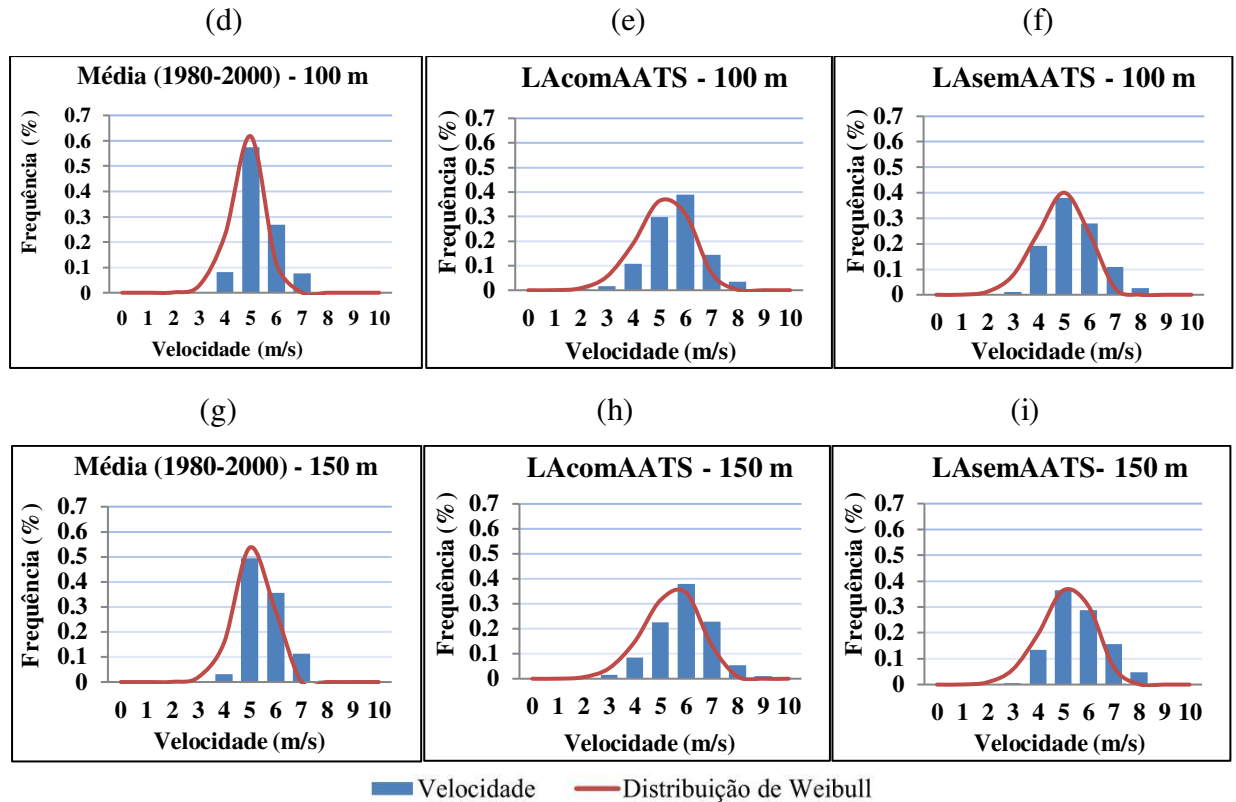


Figura 40 - Função Distribuição de frequência e ajuste da distribuição de Weibull para a velocidade do vento em 10 m, 100 m e 150 m acima da superfície, (a), (d) e (g) média de 1980 a 2000, (b), (e) e (h) LAcomAATS, (c), (f) e (i) LAsemAATS respectivamente.

6.3.5 Estimativas da Densidade de Potência Eólica em Petrolina (PE)

A Tabela 1 a seguir, apresenta a média da velocidade do vento, os parâmetros da distribuição de Weibull e a média da densidade de potência eólica em W/m^2 para a cidade de Petrolina-PE nas alturas de 10 m, 100 m e 150 m durante o período de 1980 a 2000 e eventos de El Niño e La Niña ocorrendo com e sem anomalias de TSM no ATS dentro desse período. Esses valores foram obtidos para o trimestre de DJF.

Tabela 1 - Parâmetros meteorológicos em Petrolina (PE)

Parâmetros/Variáveis	Petrolina (PE)		
	Média de 1980-2000		
Altura	10 metros	100 metros	150 metros
Média da velocidade do vento (m/s)	3,47	4,84	5,08
Weibull – Fator de forma k	8,57	8,57	8,57
Weibull – Fator de escala c (m/s)	3,67	5,12	5,38
Média da densidade de potência (W/m^2)	28,75	71,90	85,30
	ELcomAATS		
Altura	10 metros	100 metros	150 metros
Média da velocidade do vento (m/s)	3,51	4,58	5,15
Weibull – Fator de forma k	6,44	6,44	6,44

Weibull – Fator de escala c (m/s)	3,76	4,98	5,52
Média da densidade de potência (W/m ²)	29,31	67,69	91,27
	ELsemAATS		
Altura	10 metros	100 metros	150 metros
Média da velocidade do vento (m/s)	3,81	5,32	5,58
Weibull – Fator de forma k	7,15	7,15	7,15
Weibull – Fator de escala c (m/s)	4,06	5,68	5,99
Média da densidade de potência (W/m ²)	35,65	99,12	114,87
	LacomAATS		
Altura	10 metros	100 metros	150 metros
Média da velocidade do vento (m/s)	3,68	5,13	5,39
Weibull – Fator de forma k	5,71	5,71	5,71
Weibull – Fator de escala c (m/s)	3,97	5,55	5,82
Média da densidade de potência (W/m ²)	33,94	92,73	107,35
	LAsemAATS		
Altura	10 metros	100 metros	150 metros
Média da velocidade do vento (m/s)	3,48	4,86	5,11
Weibull – Fator de forma k	5,64	5,64	5,64
Weibull – Fator de escala c (m/s)	3,76	5,26	5,52
Média da densidade de potência (W/m ²)	28,97	78,94	91,38

Na Tabela 1 é possível observar que o valor médio da densidade de potência eólica para o período de 1980 a 2000 é de 28,75 W/m², 71,90 W/m² e 85,30 W/m² para 10 m, 100 m e 150 m respectivamente. Os episódios de ELcomAATS e altura de 100 m apresenta o mais baixo dos valores de densidade de potência eólica a essa altura, e como dito antes podendo indicar uma relação da influência do Oceano Atlântico Tropical Sul na redução da produção de energia eólica nessa região, diferentemente dos episódios de La Niña, sejam eles LacomAATS ou LAsemAATS, onde para essa altura de 100 m e demais alturas apresentaram valores de densidade de potência eólica acima da média da região, com valores de maior relevância, entre os episódios de La Niña, aqueles onde há a presença de anomalias negativas de TSM no ATS ou seja, quando o ATS está frio.

Em relação aos episódios de La Niña, as análises sugerem que, mesmo o evento de La Niña, onde se espera valores de velocidade do vento abaixo da média climatológica, a exploração de energia eólica pode ser viável, pelo menos nessa região de Petrolina-PE.

De todos os fenômenos, os episódios de ELsemAATS foram os que indicaram ser mais promissores para exploração de energia eólica nessa região, onde apresentaram respectivamente para as alturas de 10 m, 100 m e 150 m valores de 6,9 W/m², 27,22 W/m² e 29,57 W/m² acima da média da região durante o período analisado.

Em relação aos episódios de El Niño onde se espera que os valores de velocidade do vento em Petrolina-PE sejam acima da média, aqueles de El Niño onde há a presença de anomalias positivas de TSM no Oceano Atlântico Tropical Sul, pode resultar em uma resposta

diferente daquela normalmente esperada durante o período de atuação desse fenômeno, pelo menos a altura de 100 m que, é geralmente a altura de atuação dos aerogeradores, podendo indicar que a produção de energia eólica é negativamente afetada em períodos de El Niño onde se observam anomalias positivas de TSM no ATS.

Desta forma, com todos esses resultados obtidos até aqui, para região de Petrolina-PE fica evidente que mesmo no trimestre de DJF que é considerado um período em que se observam os menores valores de intensidade do vento no ano, a exploração de energia eólica pode ser viável e depende da condição de anomalias em cada oceano (Pacífico Tropical e Atlântico Tropical Sul), obviamente desconsiderando outras regiões dos oceanos.

7. CONCLUSÕES

Os dados médios horários da componente zonal (u) e meridional do vento (v) à 10 m no Nordeste brasileiro e na região de Petrolina-PE, provenientes das reanálises do ECMWF com o conjunto de dados do Era-5 Land de alta resolução espacial (9km), foram submetidos a diversos cálculos cujo o objetivo principal foi analisar anomalias de intensidade do vento resultantes de um efeito simultâneo de anomalias da TSM no Atlântico Tropical Sul e das anomalias da TSM no Pacífico Tropical (ENSO) durante o Trimestre DJF entre os anos de 1980 a 2000.

- A análise da distribuição espacial da intensidade do vento indica que há mudanças no padrão do vento do Nordeste brasileiro. Episódios de El Niño com anomalias positivas de TSM no Atlântico Tropical Sul contribui para redução da intensidade do vento em grande parte do Nordeste Brasileiro. Por outro lado, episódios de La Niña com anomalias negativas de TSM no Atlântico Tropical Sul contribui para aumentar a intensidade do vento em grande parte da região.
- As análises das características do vento na região de Petrolina-PE no trimestre DJF, durante o período analisado, indicam que, anomalias positivas da TSM no Atlântico Tropical Sul durante o período de atuação do El Niño, reduziriam a geração de energia eólica, enquanto anomalias negativas de TSM no Atlântico Tropical Sul, durante o período de atuação da La Niña, aumentaria a geração de energia eólica na região.
- Os parâmetros da distribuição de Weibull indicam em todas as alturas analisadas, menor regularidade do vento e menor densidade de potência eólica para os episódios de El Niño com anomalias positivas de TSM no ATS quando comparados com a média de 1980 a 2000 e com os episódios El Niño sem anomalias de TSM no ATS. Enquanto que, nos episódios de La Niña com anomalias negativas de TSM no Atlântico Tropical Sul, foi observada maior regularidade do vento para a altura de 10m e menor regularidade do vento para as demais alturas quando comparados com episódios de La Niña sem anomalias de TSM no ATS, entretanto, também foi observado para esse evento, em todas as alturas, maior densidade de potência eólica em relação a média do período de 1980 a 2000 e também em relação aos episódios de La Niña sem anomalias de TSM no ATS.

8. REFERÊNCIAS

ANDREOLY, R. V.; KAYANO, M. T. Tropical Pacific and South Atlantic Effects on Variability Over Northeast Brazil. 2006.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Banco de informações de Geração: Capacidade de geração do Brasil. 2017. Disponível em: <[Boletim de Informações Gerenciais \(aneel.gov.br\)](http://Boletim de Informações Gerenciais (aneel.gov.br))>. Acesso em: 02/07/2020.

ARAÚJO, Bruno Plattek de; WILLCOX, Luiz Daniel. Reflexões críticas sobre a experiência brasileira de política industrial no setor eólico. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n.47, p. [163]-220, mar. 2018.

BARRETO, A. B. Estudo do Ciclo Diário do Vento à Superfície no Nordeste do Brasil. **Dissertação de Mestrado**. Campina Grande – PB. 2001.

BASTOS R. R.; CUNHA, C. F.; LOPES, M. A. G.; MOREIRA, D. M. Estudo do Campo de Velocidades do Vento com utilização dos Modelos Computacionais: WRF e WindStation. Julho, 2012.

BENTO, G. M.; SANTOS, R. T. Avaliação de métodos de remoção de outliers e seus impactos na precisão dos métodos de interpolação. **1º Simpósio Mato-Grossense de Mecanização Agrícola e Agricultura de Precisão** – SIMAP UFMT, Campus Universitário de SINOP, 2018.

BEZERRA, F. D. Energia eólica no Nordeste. BNDES Setorial, Fortaleza – CE, n. 66, p. 1-20, fev. 2019

BJERKNES, J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. **Monthly Weather Review**, v. 97, n. 3, p. 163-172, 1969.

BRITO, L. S. Análise do Vento sobre o Nordeste do Brasil na reanálise centenária ERA-20C: Variabilidade Interanual e Extremos. 2018. **Dissertação** (mestrado) - Universidade de São Paulo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas Departamento de Ciências Atmosféricas, SP.

CALDAS, D. M. Estudo do potencial eólico e estimativa de geração de energia de um projeto eólico na cidade do Rio de Janeiro utilizando o WindPro e o WAsP. **Projeto** submetido ao corpo docente do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio De Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de engenheiro eletricitista, 2010.

CASTRO, Rui M.G. Introdução à Energia Eólica. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico – **Secção de Energia**. Edição 2.1 – 2005.

CARVALHO, A. L.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; PORFIRIO, A. C. S. Ocorrência de Períodos Secos na Região de Rio Largo, Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.2, 173 – 180, 2013.

CAVALCANTI, E. P.; SILVA, B. B.; SILVA, V. P. R.; CHAVES FILHO, J. B. Variabilidade da Velocidade do vento e Influências Oceânicas: Uma Abordagem Para Fins de Geração de Energia Elétrica no Nordeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências** – UFRJ 2020.

CAVALCANTI, C. Z., ADAMI, V. S., Programa demonstrativo para inovação em cadeia produtiva selecionada. **Ciência tecnologia e inovação**. Brasília DF 2015.

CAVALCANTI, I. F. A., 1985 . Casos de intensa precipitação nas regiões sul e sudeste do Brasil no período de inverno de 1979-1983. INPE-3743-RPE/498.

CHAVES FILHO, J. B. Variabilidade da velocidade do vento a 10 metros para a região Nordeste do Brasil. 2016. **Dissertação** (mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Ciências Atmosféricas, PB.

CORREIA, M. F. Impacto das Ações Antrópicas no Clima do Submédio do Rio São Francisco: Um Estudo Numérico e Observacional. 2001. 181p. **Tese** (Doutorado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

CORREIA, M. F.; SILVA DIAS, M. A. F.; SILVA ARAGÃO, M. R. Soil occupation and atmospheric variations over Sobradinho Lake area. Part One: An observational analysis. *Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 94, p. 103-113, 2006a. DOI 10.1007/s00703-005-0173-4

CORREIA, M.F.; SILVA DIAS, M.A.F.; SILVA ARAGÃO, M.R. Soil occupation and atmospheric variations over Sobradinho Lake area. Part Two: A regional modeling study. *Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 94, p. 115-128, 2006b. DOI 10.1007/s00703-005-0174-3

CUNHA, C. F.; BASTOS R. R.; LOPES, M. A. G.; MOREIRA, D. M. Estudo do Campo de Velocidades do Vento com utilização dos Modelos Computacionais: WRF e WindStation. Julho, 2012.

ENFIELD, D.B.; Mayer, D.A. 1997. Tropical Atlantic sea surface temperature variability and its relation to LA Niña-Southern Oscillation. **Journal of Geophysical Research**, 102: 929–945.

FARIA, B. L.; JUSTINO, F. B. Estudo do Impacto do Aquecimento Global no Potencial Eólico do Nordeste Brasileiro. Instituto Federal do Norte de Minas Gerais – IFNMG, 2011.

FARIA, Bruno Lopes de. Modeling the wind power potential in the northeast of Brazil under current conditions and global warming: an interface between microscale and mesoscale numerical models. 2010. 72 f. **Dissertação** (Mestrado em Agrometeorologia; Climatologia; Micrometeorologia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

FERREIRA, A. G. e MELLO, N G. S. Principais Sistemas Atmosféricos Atuantes Sobre a Região Nordeste do Brasil e a Influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico no Clima da Região - **Revista Brasileira de Climatologia**, Vol. 1, N 1. 2011.

FERREIRA, C. C. (Sem data) Adversidades Climáticas Geradoras de Episódios de Inundação.

FIGLIUOLO, G. C.; ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T.; SOUZA, R. A. F. Variabilidade multiescalar da cota do Rio Negro e sua relação com os padrões de TSM do Pacífico e Atlântico. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 19. (CBMET), 2016.

FISHER, G. R.; Gomes, R. G. Características dos Campos de Vento Horizontal e de Umidade Específica nos dias 10/07/2003. 2003.

FONTENELLE, Ana Luiza Pimenta. Geração eólica urbana e segurança energética: uso de dados de reanálise atmosférica para avaliação do potencial preliminar. 2019. 1 recurso online (102 p.). **Dissertação (mestrado)** - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.

FREIRE, J. L. M.; LIMA, J. R. A.; CAVALCANTI, E. P. Análise de Aspectos Meteorológicos sobre o Nordeste do Brasil em Anos de El Niño e La Niña - **Revista Brasileira de Geografia Física** 03, 2011.

GARCIA, A.; TORRES, J.L.; PRIETO, E.; DE FRANCISCO, A. Fitting wind speed distributions: A case study. **Solar Energy**. v.62, n.2, p.139-144, 1998.

GIANNINI, A. CHIANG, J. C. H.; CANE, M. A.; KUSHNIR, Y.; SEAGER, R. The ENSO teleconnection to the tropical Atlantic Ocean: Contributions of the remote and local SSTs to rainfall variability in the tropical Americas. **Journal of Climate**, v. 14, n. 24, p. 4530-4544, 2001.

GIANNINI, A.; SARAVANAN, R.; CHANG, P. The preconditioning role of tropical Atlantic variability in the development of the ENSO teleconnection: implications for the prediction of Nordeste rainfall. **Climate Dynamics**, v. 22, n. 8, p. 839-855, 2004.

GO. Associados. Impactos socioeconômicos e ambientais da geração de energia eólica no Brasil. 2020.

GOMES, V. P.; GALVÍNCIO, J. D.; MOURA, M. S. B.; FERREIRA, P. S.; PAZ, Y. M.; MIRANDA, R. Q. Sensoriamento remoto Hyperspectral aplicado para análise dos indicadores de resiliência e suscetibilidade do bioma caatinga frente às mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 2016.

GONÇALVES, A. P.; LOPES, C. R.; MARTINS, M. As Chuvas e as secas influenciadas pelo El Niño e La Niña no Sul e Nordeste Brasileiro. Instituto Federal de educação, ciências e tecnologia de santa Catarina campus Florianópolis, departamento acadêmico de saúde e serviços, curso técnico de meteorologia, 2009.

GONZALEZ, Rosimeire Araújo. Efeitos do gradiente de TSM zonal entre as bacias do Pacífico e Atlântico no norte da América do Sul durante episódios ENOS. 2011. 124 f. **Dissertação** (Mestrado em Meteorologia, Climatologia, Hidrologia e Interação Biosfera-Atmosfera) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2011.

HASTENRATH, C. S.. Forcing of anomalous sea surface temperature evolution in the tropical Atlantic during Pacific warm events. **Journal of Geophysical**, 100: 835-847. 1995.

IBGE. Acervo IBGE – Mapa Físico do Brasil, 2020. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br>>. Acesso em: 20/06/2020.

IEA (2019), Global Energy & CO2 Status Report 2019, **IEA**, Paris. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019>>. Acesso em: 24 de setembro de 2020.

JUNIOR, G. N. A. et al. Caracterização da Direção Predominante, Velocidade Máxima e Média do Vento do Município de Petrolina – PE. **Pensar Acadêmico**. Manhuaçu, v. 17 n.1, p. 43-49, janeiro-abril, 2019.

KANE, R. P. El Niño and La Niña events and rainfall in NE and South Brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.10, p.49-59, 1992.

KEMENES, A.; FERREIRA, L. G. C. Influência das anomalias de temperatura da superfície do mar (Atlântico e Pacífico) sobre o acúmulo de água em reservatórios do interior do Nordeste do Brasil (1998-2015), EMBRAPA 2019, DOCUMENTOS 263.

KOUSKY, V. E.; Cavalcanti, I. F. A. Episódios Oscilação Sul / El Niño. Características, evolução e anomalias de precipitação. **Ciência e Cultura**, 1984.

Gan, M.A e Kousky, V.E., 1982. Um Estudo Observacional sobre as Baixas Frias da Alta Troposfera nas Latitudes Subtropicais do Atlântico Sul e Leste do Brasil. INPE, São José dos Campos, SP. 25 págs.

LEE, .S; Enfield D.B ; Wang.C. 2008. Why do some El Niños have no impact on tropical North Atlantic SST? **Geophysical Letters** 35: L16705.

LIMA, C. N. N. Estimação do impacto do El Niño/La Niña na intensidade dos ventos do Nordeste brasileiro utilizando os Modelos GAS. **Dissertação** (Mestrado) apresentado ao programa de pós-graduação em Engenharia elétrica do Departamento de Engenharia elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-RIO. (2014).

LIMA, F. J. L.; GUEDES, R. V. S.; SILVA, A. P. N.; SILVA, E. M.. Avaliação do Potencial eólico no município de Jaguaruana, litoral Cearense. 2011.

LIU, Z.; ALEXANDER, M. Atmospheric bridge, oceanic tunnel, and global climatic teleconnections. **Reviews of Geophysics**, v. 45, 2007.

LOPES, A.M.G. Windstation Version 2.0.6 User's Manual. EasyCFD. Coimbra. 2010.

MALANDRIN, D. A.; VIDAL, F.; FRANCO, G. M.; NOCETTI, M.; SIZANI, R.. Climatologia eólica de Santa Catarina. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina CEFET/SC, 2007.

MANN, M. E.; KOZAR, M. E.; CAMARGO, S. J.; KOSSIN, J. P. Stratified statistical models of North Atlantic basin-wide and regional tropical cyclone counts. Artigo publicado em: **Journal of Geophysical Research Atmospheres** · September 2012.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, L. M., A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **ResearchGate** 2016.

MARIANO, E. B. Simulação do Modelo BRAMS para instalação de Parque Eólico no Nordeste Setentrional Oriental do Brasil. **Tese** (Doutorado) apresentado ao Programa de Pós Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande PB, 2017.

MÉLICE, J.-L.; SERVAIN, J. The tropical Atlantic meridional SST gradient index and its relationships with the SOI , NAO and Southern Ocean. **Climate Dynamics**, v. 20, p. 447–464, 2003.

MELO, Ewerton Cleudson de Sousa; ARAGAO, Maria Regina da Silva; CORREIA, Magaly de Fatima. Regimes do vento à superfície na área de Petrolina, submédio São Francisco. **Rev. bras. Meteorologia**. São Paulo , v. 29, n. 2, p. 229-241, June 2014.

MICALICHEN, Mauren Lucila Marques de Moraes; DIAS, Nelson Luís da Costa. Análise comparativa da velocidade do vento e da temperatura do ar, entre dados gerados por reanálises meteorológicas e dados observacionais na região de Minas Gerais. **Ciência e Natura**, [S.L.], v. 40, p. 20-25, 22 mar. 2018. Universidad Federal de Santa Maria.

MOLINA, J. J. C. El Niño 1997 – 98 y su Impacto Climático Global. Universidade de Almerfa 1998, **Papeles de GEOGRAFÍA**, n: 27, pg: 15-40. 1998.

OLIVEIRA, S. S. de. Análise do potencial eólico do Estado da Paraíba utilizando modelos de mesoescala. 2013. 127 f. **Tese** (Doutorado em Meteorologia) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2013.

PEZZI, L. P.; CAVALCANTI, I. F. A. The relative importance of ENSO and tropical Atlantic sea surface temperature anomalies for seasonal precipitation over South America: a numerical study. **Climate Dynamics**, v. 17, n. 2-3, p. 205-212, 2001.

PHILANDER, S. G. El Niño, La Niña, And the Southern Oscillation. New York, **Academic Press**, 1990. P. 293.

PINTO, A. C.; OLIVEIRA, J. C.; GUIMARÃES, G. C.; MORAES, A. J.; SALERNO, C. H.; CARVALHO, B. C.; WERNER Jr, D.; VITÓRIO, Z. S. Modelo de um Sistema de Conversão de Energia Eólica Dotado de Gerador Síncrono: Avaliação da Qualidade da Energia no Ponto de Conexão com a Rede Elétrica. FURNAS, 2007.

RAMOS, R. P. L. Precipitation characteristics in the Northeast Brazil dry region. *Journal of Geophysical Research*, v. 80, n. 12, p. 1665-1678, 1975.

REBOITA, S. M.; SANTOS, A. I. Influência de Alguns Padrões de Teleconexão na Precipitação no Norte e Nordeste do Brasil, v. 1, p. 29 2014 **revista brasileira de climatologia**.

RIO, J. F. G. do. Estimativas Preliminares do Potencial Eólico na Ausência de Dados de Vento Locais. 2008. **Dissertação (Mestrado)** — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.

SALINI, M. F. A influência do fenômeno El Niño Oscilação Sul – ENOS (La Niña e El Niño) na ocorrência de inundações no Vale do Taquari – RS. **Monografia** apresentada ao curso de Engenharia Ambiental, do Centro Universitário UNIVATEES, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental 2011.

SANSIGOLO, C. A.; Reis, T. G. Probabilidade de precipitações sazonais no NO e NE do Brasil. XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2014.

SANTOS, Alexandre Torres Silva dos. Um estudo sobre a variabilidade do vento no nordeste do Brasil através de métodos estatísticos e via modelos dinâmicos de meso e micro escala. 2014. 109f. **Tese** (Doutorado em Ciências Climáticas) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

SEYE, O. Energia Eólica - Apresentação em tema: “Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD, Faculdade de Engenharia. Curso Engenharia de Energia”, 2017.

SIMAS, M. S., Energia Eólica e Desenvolvimento Sustentável no Brasil: Estimativa da Geração de Empregos por Meio de uma Matriz Insumo-Produto Ampliada. **Dissertação**. São Paulo 2012.

SILVA, P. K. de. Análise e previsão de curto prazo do vento através de modelagem estatística em áreas de potencial eólico no Nordeste do Brasil. 2017. 166 f. **Tese** (Doutorado em Meteorologia) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2017.

SHUKLA, J. MOURA, A. D.; On the dynamics of droughts in Northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Boston, v. 38, p.2653-2675, 1981.

SILVA, B. B.; ALVES, J. J. A.; CAVALCANTI, E. P.; VENTURA, E. D. Variabilidade Espacial e Temporal do Potencial Eólico da Direção Predominante do Vento no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.19, n.2, 189-202, 2004.

SOUZA, E. B.; KAYANO, M. T.; TOTA, J. PEZZI, L.; FISCH, G.; NOBRE, C. On the influences of the El Niño, La Niña and Atlantic Dipole pattern on the Amazonian Rainfall during 1960-1998. **Acta Amazonica**, v. 30, n. 2, p. 305–318, 2006.

STUKER, E. Utilização de dados de reanálise na estimativa do potencial eólico bruto no estado do Rio Grande do Sul. **Trabalho de conclusão de curso** – Alegrete, Universidade Federal de Pampa, campus Alegrete. Curso de Engenharia Elétrica, 2014.

STÜKER, E.; SCHUSTER, C. H.; SCHUSTER, J. J.; SANTOS, D. C.; MEDEIROS, L. E.; COSTA, F. D.; DEMARCO, G.; PUHALES, F. S. Comparação entre os dados de Vento das Reanálises Meteorológicas ERA-INTERIM e CFSR com dos dados das estações automáticas do INMET no Rio Grande do Sul. **Ciência e Natura**, [S.L.], v. 38, p. 285-290, 20 jul. 2016. Universidad Federal de Santa Maria.

TRENBERTH, K. E.; CARON, J. M. The Southern Oscillation Revisited: Sea Level Pressures, Surface Temperatures, and Precipitation. National Center for Atmospheric Research, *Boulder, Colorado. **Journal of Climate**. Vol 13, 2000.

TUCHTENHAGEN, Patrícia; BASSO, João; YAMASAKI, Yoshihiro. Avaliação do Potencial Eólico no Brasil em 2011. **Ciência e Natura**, [S.L.], v. 36, n. 2, p. 390-401, 14 nov. 2014. Universidad Federal de Santa Maria.

UVO, C. B.; REPELLI, C. A.; ZEBIAK, S. E.; KUSHNIR, Y. The Relationships between Tropical Pacific and Atlantic SST and Northeast Brazil Monthly Precipitation. **Journal of Climate**, v. 11, n. 4, p. 551– 562, 1 abr. 1998.

VALLADARES NETO, J.; SANTOS, C. B.; TORRES, É. M.; ESTRELA, C. BOXPLOT: Um Recurso Gráfico Para a Análise e Interpretação de Dados Quantitativos. Ver. **Ondontol Bras Central**. 2017; 26(76): 1-6. ISSN 1981-3708.

VILAR, R. A. A.; CORREIA M. F.; NÓBREGA R. S.; ARAGÃO, M. R. S.; BARBIERI, L. F. P.; MOURA FILHO, M. G. Avaliação do impacto de Secas Severas no Nordeste Brasileiro na Geração de Energia Elétrica Através do Modelo Newave: Projeção das Energias Afluentes e Armazenadas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 1, 89-98. 2020.

WANG, Chunzai. An overlooked feature of tropical climate: Inter-Pacific-Atlantic variability. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 12, 2006.

YOON, J.; ZENG, N. An Atlantic influence on Amazon rainfall. **Climate Dynamics**, v. 34, n. 2-3, p. 249-264, 2010.

9. FONTE DAS FIGURAS

Figura 1: Disponível em: <[424 ABEEolica INFOVENTO N18 v4](#)> acesso em: 15/11/2020

Figura 2: Disponível em: <[424 ABEEolica INFOVENTO N18 v4](#)> acesso em: 15/11/2020

Figura 3: Disponível em: <[NORDESTE 2019Eolica.pdf](#)>, Adaptado com informações de <[424 ABEEolica INFOVENTO N18 v4](#)> acesso em: 10/05/2020 e acesso em: 27/11/2020 respectivamente

Figura 4: disponível em: <[NORDESTE 2019Eolica.pdf](#)> acesso em: 11/2020

Figura 5: disponível em: <[424 ABEEolica INFOVENTO N18 v4](#)> acesso em: 27/11/2020

Figura 6: disponível em: <[ABEEólica | Outros Formato \(abeeolica.org.br\)](#)> acesso em 12/2021.

Figura 7: disponível em: <[ABEEólica GO-Associados-V.-Final.pdf \(abeeolica.org.br\)](#)>, acesso em: 11/2020.

Figura 8: disponível em: <[ABEEólica GO-Associados-V.-Final.pdf \(abeeolica.org.br\)](#)> acesso em: 11/2020.

Figura 9: disponível em: <[Map of the Pacific Ocean with Niño 1+2 \(white\), Niño 3 \(red\), Niño 3.4... | Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](#)> acesso em: 01/01/2021.

Figura 13: disponível <[evolnino3.gif \(510x442\) \(inpe.br\)](#)> acesso em: 28/08/2020.

Figura 14: disponível <[evolnina3.gif \(510x442\) \(inpe.br\)](#)> acesso em: 28/08/2020.

Figuras 16, 17, 18: disponível em: [The Walker Circulation: ENSO's atmospheric buddy | NOAA Climate.gov](#), acesso em: 05/2020.

Figura 19: disponível em: [IBGE | Biblioteca](#), acesso em 10/2020.

Figura 20: disponível em: <[PPT - COMPONENTES DE UM MODELO DE MESOESCALA PowerPoint Presentation, free download - ID:4756994 \(slideserve.com\)](#)> acesso em: 20/08/2020

Figura 23: disponível em <[LAPA \(ufr.br\)](#)>. acesso em: 10/01/2020.

Figura 24: disponível em <[- Crescimento dos aerogeradores – diâmetro do rotor, altura de torre e... | Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](#)> acesso em: 01/2021.

ABEEOLICA: <http://abeeolica.org.br/>

ANEXO 1

El Niño, WTSA	El Niño, NTSA	La Niña, CTSA	La Niña, NTSA	ENSO Neutral, WTSA	ENSO Neutral, CTSA
1940-41	1913-14	1942-43	1916-17	1915-16	1917-18
1951-52	1918-19	1954-55	1922-23	1920-21	1921-22
1972-73	1925-26	1955-56	1924-25	1923-24	1929-30
1982-83	1930-31	1975-76	1949-50	1934-35	1950-51
1997-98	1941-42	1996-97	1967-68	1945-46	1953-54
-	1957-58	-	1970-71	1963-64	1959-60
-	1986-87	-	1973-74	1983-84	1969-70
-	1991-92	-	1984-85	1987-88	1977-78
-	-	-	1988-89	1994-95	1980-81
-	-	-	1998-99	-	-

Anos com episódios de El Niño/La Niña e ATS Quente/ATS Frio ocorrendo simultaneamente/Separadamente para o período de 1912-1999.

Fonte: Andreoly e Kayano (2006).